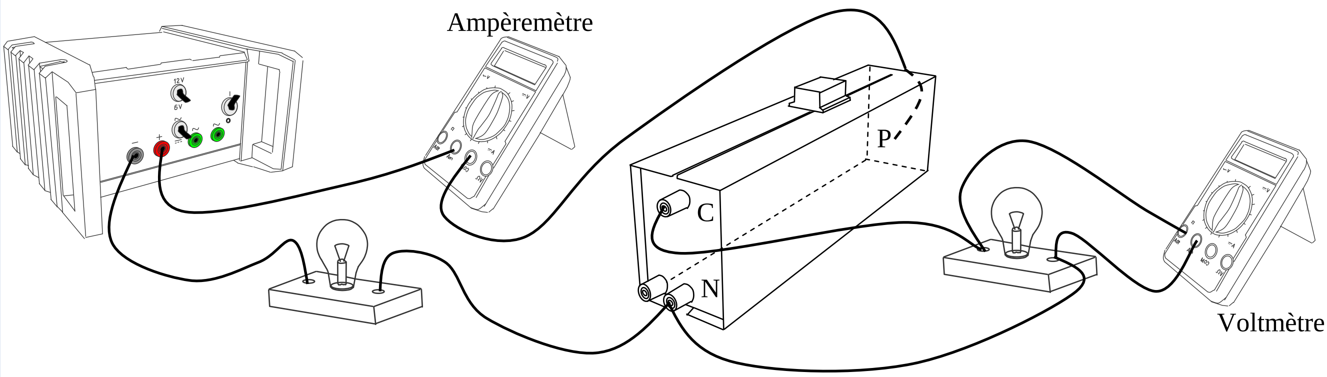
COLLECTION SAWD

PHYSIQUE 1S

WAHAB DIOP

PREMIERES S1 & S2



Notes de Cours | Wahab Diop

Table des matières

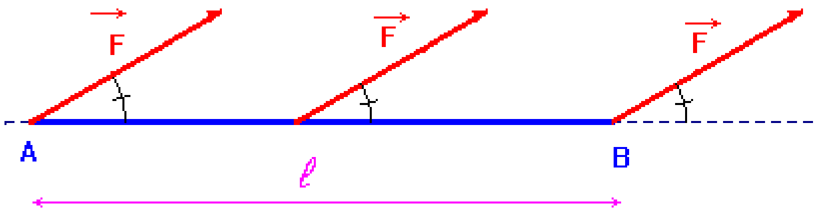
Travail et puissance d'une force

I. Travail d'une force d'un solide en translation rectiligne

1. Travail d'une force constante dont le point d'application suit un trajet rectiligne.

a) Expression du travail

• Une force constante est représentée par un vecteur qui reste parallèle à lui même et qui conserve le même sens et la même valeur au cours du temps.



• Définition : Dans un référentiel donné, le travail d'une force constante $\vec{F}$ dont le point d'application se déplace de A vers B suivant un trajet rectiligne est donné par :

$$\boxed{W_{A\to B}(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AB}} \Rightarrow \boxed{W_{A\to B}(\vec{F}) = \|\vec{F}\|\,\|\overrightarrow{AB}\|\cos(\vec{F},\overrightarrow{AB})}$$

Souvent, on pose : $\|\vec{F}\|$ = F; $\|\overrightarrow{AB}\|$ = AB=ℓ; $(\vec{F},\overrightarrow{AB})$ = α (en radian ou en degré)

Le travail de la force constante $\vec{F}$ s'écrit alors : $\boxed{W_{A\to B}(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AB} = F\times AB\times\cos\alpha}$

Unités : Force F en newton (N); déplacement AB en mètre (m) ; le travail W_{AB} en joule (J)

$$\boxed{\text{Autre expression du produit scalaire: } \vec{u}.\vec{v} = x_{\vec{u}}x_{\vec{v}} + y_{\vec{u}}y_{\vec{v}}}$$

b) Travail moteur, résistant ou nul :

Le signe du travail $W_{A\to B}(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{AB}$ = F×AB×cosα est celui de cos α. En effet F et AB sont positifs alors que la valeur de cos α est comprise entre - 1 et + 1.

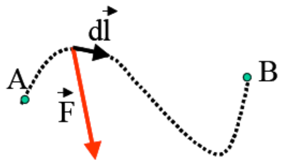
- Si l'angle α = $(\vec{F},\overrightarrow{AB})$ est aigu ($0 \leqslant \alpha < \frac{\pi}{2}$) alors cos α > 0 et $W_{AB}(\vec{F}) > 0$. Le travail est moteur

- Si l'angle α =$(\vec{F},\overrightarrow{AB})$ est obtus $\left(\frac{\pi}{2} < \alpha \leqslant \pi\right)$ alors cos α < 0 et $W_{AB}(\vec{F}) < 0$. Le travail est résistant

- Si l'angle $\alpha = (\vec{F}, \overrightarrow{AB})$ est droit ($\alpha = 90° = \frac{\pi}{2}$ rad) alors $\cos \alpha = 0$ et $W_{AB}(\vec{F}) = 0$ J. Le travail est nul.

Retenons qu'une force perpendiculaire à la trajectoire ne fournit aucun travail.

Le travail d'une force est une grandeur algébrique; il peut être positif, négatif ou nul.



2. Travail d'une force variable et d'un deplacement quelconque de A vers B: le travail elementaire

Pour calculer le travail d'une force variable, on découpe le trajet en trajets élémentaires suffisamment petits (supposés rectilignes) pour considérer que la force est constante sur chacun des déplacements élémentaires.

Par définition, le travail élémentaire de la force $\vec{F}$ pour le déplacement élémentaire $\overrightarrow{\delta\ell}$ est donné par la relation :

$$\boxed{\delta W(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{\delta\ell}}$$

Pour obtenir le travail de la force variable $\vec{F}$, sur le trajet de **A** à **B**, on fait la somme de tous les travaux élémentaires :

$$\boxed{W_{AB}(\vec{F}) = \sum_A^B \delta W(\vec{F}) = \sum_A^B \vec{F}.\overrightarrow{\delta\ell}}$$

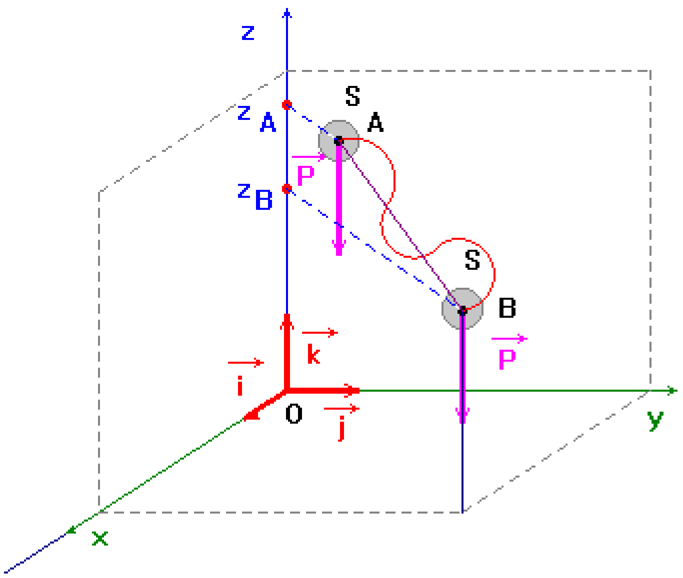
3. Étude de quelques travaux particuliers

a) Le travail du poids

Considérons un solide **S** de masse **m** et de centre d'inertie **G** se déplaçant dans un champ de pesanteur uniforme $\vec{g}$.

La définition du travail mécanique d'une force constante s'applique dans ce cas.

$$W_{AB}(\vec{P}) = \vec{P}.\overrightarrow{AB} = P \times AB \times \cos\alpha$$



Dans le repère choisi, on peut exprimer les coordonnées de chaque vecteur :

$$\vec{P}\begin{cases} P_x = 0 \\ P_y = 0 \\ P_z = -mg \end{cases} \quad \text{et} \quad \overrightarrow{AB}\begin{pmatrix} x_B - x_A \\ y_B - y_A \\ z_B - z_A \end{pmatrix}$$

En conséquence : $\boxed{W_{AB}(\vec{P}) = -mg(z_B - z_A) = mg(z_A - z_B)}$

Le travail du poids d'un solide ne dépend que des altitudes des points de départ et d'arrivée de son centre de gravité. Il ne dépend pas du chemin suivi pour aller de A vers B. Le poids est une force conservative.

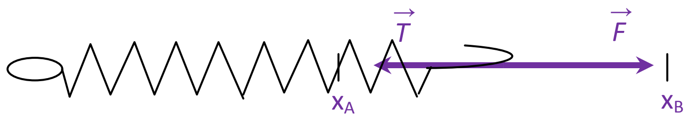
Remarque : Appelons h la dénivellation entre A et B: $\boxed{W_{AB}(\vec{P}) = \pm mgh}$

Signe + si m descend (travail moteur) et signe - si m monte (travail résistant)

b) Travail de la tension d'un ressort

La force appliquée à l'extrémité d'un ressort par un opérateur (l'autre extrémité étant fixe) est appelée tension du ressort.

La tension du ressort $\vec{T} = -k.\overrightarrow{OM}$. Avec **O** position de l'extrémité du ressort à vide et **M** position de l'extrémité du ressort lorsqu'il est déformé. On prend l'axe **x'Ox** pour repérer l'allongement algébrique : $\vec{T} = -k.x.\vec{i}$



Calculons le travail de la tension du ressort pour passer de l'allongement **x** $_A$ à l'allongement **x** $_B$.

Comme l'allongement passe de **x** $_A$ à **x** $_B$, la force varie au cours du déplacement. Le travail se calcule en prenant une infinité de déplacements élémentaires : $\overrightarrow{d\ell} = dx.\vec{i}$

On en déduit l'expression du travail élémentaire effectué par la force $\vec{T}$ pour passer de l'allongement **x** à l'allongement **x** + **dx** :

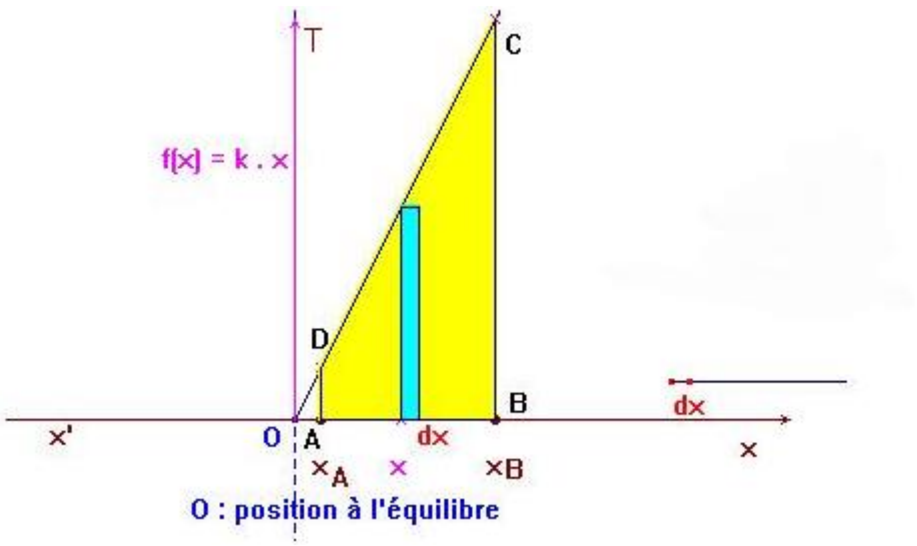
$$\delta W\left(\vec{T}\right) = \vec{T}.\,\overrightarrow{d\ell} = \vec{T}.dx.\vec{i} = -\left(k.x.\vec{i}\right).dx.\vec{i} = -k.x.dx$$

<u>Calcul du travail par la méthode graphique</u>

Avec l'orientation choisie, l'allongement algébrique est positif et la valeur de la tension est proportionnelle à l'allongement algébrique **x**. En conséquence : **T** = **k** . **x.**

La courbe donnant les variations de la tension en fonction de l'allongement algébrique est une droite passant par l'origine.

<u>Graphe</u> :



Pour un déplacement élémentaire **dx**, on donne l'expression suivante du travail élémentaire :

$$\delta W\left(\vec{T}\right) = \vec{T}.\,\overrightarrow{d\ell} = \vec{T}.dx.\vec{i} = -\left(k.x.\vec{i}\right).dx.\vec{i} = -k.x.dx$$

L'expression $k.x.dx = d\mathscr{A}$ représente l'aire du rectangle bleu:

$W_{AB}\left(\vec{T}\right) = \sum_{A}^{B}\delta W\left(\vec{T}\right) = \sum_{A}^{B}\vec{T}.\,\overrightarrow{\delta\ell} = -\sum_{x_A}^{x_B}k.x.dx = -\mathscr{A}$ avec $\mathscr{A}$ l'aire du trapèze **ABCD** (aire jaune)

$$A_{ABCD} = A_{OBC} - A_{OAD}$$

$$A_{ABCD} = \frac{1}{2}OB.BC - \frac{1}{2}OA.AD$$

$$A_{ABCD} = \frac{1}{2}(x_B).(k.x_B) - \frac{1}{2}(x_A).(k.x_A)$$

$$A_{ABCD} = \frac{1}{2}k(x_B{}^2 - x_A{}^2)$$

On en déduit le travail de la force $\vec{T} = -k.x.\vec{i}$ sur le trajet considéré :

$$W_{AB}(\vec{T}) = -\frac{1}{2}k(x_B{}^2 - x_A{}^2) = \frac{1}{2}k(x_A{}^2 - x_B{}^2)$$

$$\boxed{W_{AB}(\vec{T}) = \frac{1}{2}k(x_A{}^2 - x_B{}^2)}$$

Application

Quel travail un opérateur doit-il fournir pour tendre un ressort de raideur 100 N/m de 10 cm lorsqu'il est initialement:

1) à l'équilibre?
2) déjà tendu de 5 cm?

Résultats: a) 0,500 J; b) 1,0 J (noter: $W_{op} = -W(\vec{T})$)

II. Puissance d'une force dans un mouvement de translation rectiligne

Le travail fourni par une force peut être effectué en un temps plus ou moins long. Les physiciens ont été amenés à introduire une nouvelle grandeur : la puissance qui tient compte du temps mis pour effectuer ce travail.

1. Puissance moyenne

Quand, dans un référentiel donné, une force $\vec{F}$ a effectué un travail W_{AB} entre les instants t_A et t_B, la puissance moyenne avec laquelle ce travail a été effectué est :

$$\boxed{P_m(\vec{F}) = \frac{W_{AB}(\vec{F})}{t_B - t_A}}$$

Unités : travail W en joule (J) - date t en seconde (s) - puissance en watt (W).

2. PUISSANCE INSTANTANEE

Pendant un intervalle de temps dt = $t_B - t_A$ très court une force $\vec{F}$ effectue un travail dW = $\vec{F}.\overrightarrow{d\ell}$ très petit. On définit alors la puissance instantanée avec laquelle le travail s'effectue :

$$\mathscr{P} = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{F}.\overrightarrow{d\ell}}{dt} = \vec{F}\frac{\overrightarrow{d\ell}}{dt} = \vec{F}.\vec{v} \Rightarrow \boxed{\mathscr{P} = \vec{F}.\vec{v}}$$

$\vec{v}$ est la vitesse instantanée du point d'application de la force.

d'où $$\boxed{\mathscr{P} = \vec{F}.\vec{v} = F \times v \times \cos\left(\vec{F},\vec{v}\right)}$$

Unités : puissance en watt (W) - force F en newton (N) - vitesse v en mètre par seconde (m/s)

Autre unité: le cheval-vapeur

Le nom de watt a été choisi en hommage à l'ingénieur et mécanicien écossais James Watt, célèbre pour les améliorations qu'il a apportées à la machine à vapeur à la fin du XVIII^e siècle.
Une unité traditionnelle de puissance est le cheval-vapeur (de symbole ch). Dans sa définition historique, un cheval-vapeur équivaut à la puissance nécessaire pour soulever 250 kg à une vitesse de 30,5 cm/s. Sa correspondance en watts est définie par la relation : 1 ch équivaut à 736 W.

$$\boxed{1\text{ ch} = 736\text{ W}}$$

3. AUTRE UNITE DU TRAVAIL: LE KILOWATTHEURE

On a: $W = \dfrac{\mathscr{P}}{\Delta t}$

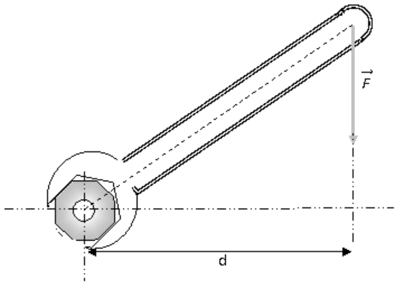
- Si $\mathscr{P} = 1kw$ et $\Delta t = 1h$, alors $W = 1kW \times 1h = 1kWh$
- $1kWh = 1000W \times 3600s = 3{,}6.10^6 J \Rightarrow \boxed{1kWh = 3{,}6.10^6 J}$

III. Travail d'une force dans un mouvement de rotation

1. MOMENT D'UNE FORCE

L'effet de rotation que produit une force $\vec{F}$ sur un solide mobile autour d'un axe Δ est le moment de la force $\vec{F}$ par rapport à cet axe. Si d est la distance entre la droite d'action de la force et l'axe Δ, il est noté:

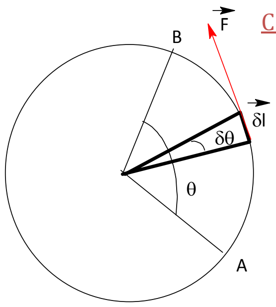
$$\boxed{\mathscr{M}(\vec{F}/\Delta) = \pm F \times d}$$



Remarque: le moment est une grandeur algébrique son signe dépend du sens positif de rotation choisi.

$\mathcal{M}$: Le moment de la force en newtons mètres [Nm]; F:La norme du vecteur force en newtons [N] et d: **bras du levier** est la distance entre la force et l'axe en mètres [m]

2. Travail d'une force de module constant dont le point d'application decrit un cercle



$$\delta W(\vec{F}) = \vec{F}.\overrightarrow{\delta\ell} = F \times \delta\ell \times \cos(\vec{F}, \overrightarrow{\delta\ell}) = F \times \delta\ell = F \times R \times \delta\theta$$

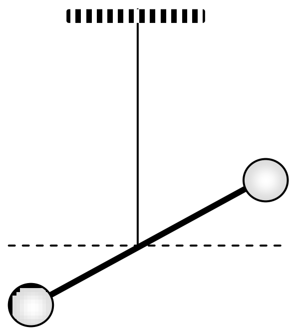
$$\delta W(\vec{F}) = \mathcal{M}(\vec{F}) \times \delta\theta \Rightarrow W(\vec{F}) = \sum \delta W(\vec{F}) = \mathcal{M}(\vec{F}) \times \sum \delta\theta$$

$\Rightarrow \boxed{W(\vec{F}) = \mathcal{M}(\vec{F}/\Delta).\theta}$ θ s'exprime en radian.

3. Travail de torsion d'un fil

La condition d'équilibre de la barre lorsqu'on la tourne d'un angle θ est:

$$\mathcal{M} + \mathcal{M}' = 0$$



$\mathcal{M} = C\theta$: moment du couple de force ;

$\mathcal{M}' = -C\theta$: moment du couple de rappel;

C($N.m.rad^{-1}$) est la constante de torsion du fil qui ne dépend que de la nature du fil.

$$\delta W(\vec{F}) = \mathcal{M}(\vec{F}) \times \delta\theta = -C\theta\delta\theta$$

En écrivant que le travail total pour une torsion d'un angle θ_1 à un angle θ_2 est la somme des travaux élémentaires, on obtient par analogie avec le calcul du travail de la tension d'un ressort, le travail du couple de torsion:

$$\boxed{W(\mathscr{C}) = \frac{1}{2}C\left(\theta_1{}^2 - \theta_2{}^2\right)}$$

4. Expression de la puissance

La puissance dans le cas d'un mouvement de rotation s'exprime comme suit:

$\mathscr{P}\left(\vec{F}\right) = \dfrac{\delta W}{\delta t} = \mathscr{M}\dfrac{\delta\theta}{\delta t} = \mathscr{M}\times\omega \Rightarrow \boxed{\mathscr{P}(\vec{F}) = \mathscr{M}(\vec{F}/\Delta)\times\omega}$ avec ω(rad/s) est la vitesse angulaire du solide en rotation autour de l'axe.

Énergie cinétique

L'énergie d'un corps est la capacité qu'a ce corps d'effectuer du travail. Lorsqu'un corps acquiert de l'énergie du fait de son mouvement, cette énergie est dite cinétique ou énergie de vitesse.

I. Énergie cinétique d'un corps en translation

1. Énergie cinetique d'un point materiel

L'énergie cinétique d'un point matériel M de masse m et de vitesse $\vec{v}$, notée Ec, est donnée par l'expression:

$$\boxed{Ec = \frac{1}{2}mv^2} \qquad \text{avec Ec(J); m(kg) et v(m/s)}$$

L'énergie cinétique est toujours positive, sa valeur croît soit avec sa masse, soit avec le carré de sa vitesse.

2. Énergie cinetique d'un solide en translation

Décomposons le solide en des points matériels M_1, M_2, …M_i de masses respectives m_1, m_2, …m_i et de vitesses respectives v_1, v_2, …v_i.

Le solide est en translation entraine que: $v_1 = v_2 = …. = v_G$. G centre d'inertie du solide.

$$Ec = \sum_1^i Ec_i = \sum_1^i \frac{1}{2}m_i{v_i}^2 = \sum_1^i \frac{1}{2}m_i{v_G}^2 = \frac{1}{2}{v_G}^2\sum_1^i m_i = \frac{1}{2}M{v_G}^2$$

$$\Rightarrow \boxed{Ec = \frac{1}{2}M{v_G}^2} \text{ où M=masse du solide}$$

Remarque: l'énergie cinétique d'un corps dépend du repère choisi

Exercice d'application:

Calculer l'énergie cinétique d'un véhicule roulant à la vitesse de 72 km/h de masse m=2000 kg.

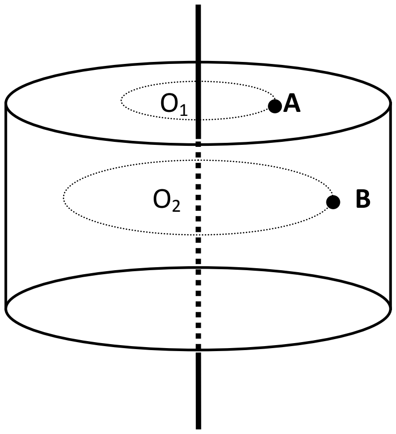
Réponse $Ec=4.10^5 J$

II. Énergie cinétique d'un solide en rotation

1. Expression de l'energie cinetique

Soit un point matériel M_i du solide considéré. Notons m_i sa masse et v_i sa vitesse linéaire.

$$Ec_i = \frac{1}{2}m_i{v_i}^2 \text{ or } v_i = r_i\omega$$



$$Ec = \sum_{1}^{i} Ec_i = \sum_{1}^{i} \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \sum_{1}^{i} \frac{1}{2} m_i (r_i \omega)^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \sum_{1}^{i} m_i r_i^2$$

On pose $J_\Delta = \sum_{1}^{i} m_i r_i^2$

D'où $\boxed{Ec = \frac{1}{2} J_\Delta \omega^2}$ avec Ec(J); J_Δ(kg/m²) et ω(rad/s)

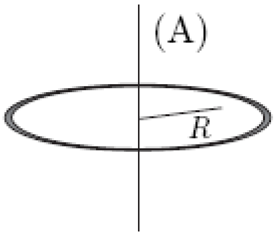
Le terme J_Δ est une grandeur géométrique indépendante du mouvement. Il ne dépend que de la répartition de la masse du système et de sa position par rapport à l'axe de rotation Δ. On l'appelle moment d'inertie du solide par rapport à Δ

Le moment d'inertie d'un système est égal à la somme des moments d'inertie des différents constituants de ce système.

$$J_\Delta = \sum_{i} J_{const}$$

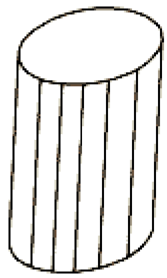
2. Moment d'inertie de quelques solides

Anneau de masse m et de rayon R



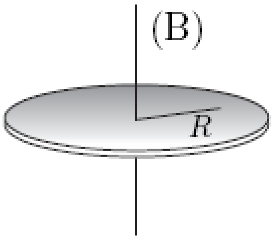
$J = mR^2$

Manchon ou cylindre creux



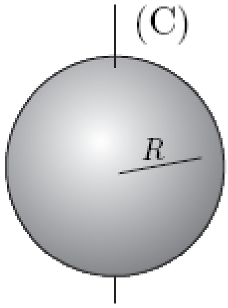
$J = mR^2$

Disque homogène ou cylindre homogène



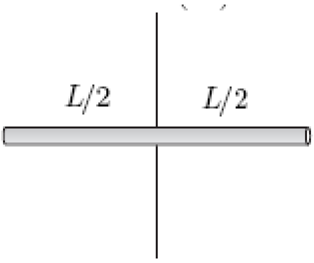
$J = \frac{1}{2} mR^2$

Sphère homogène par rapport à son diamètre



$J = \frac{2}{5} mR^2$

Moment d'inertie d'une tige



$J = \frac{1}{12} mL^2$

3. THEOREME DE HUYGENS (S1)

Le théorème de Huygens (aussi appelé théorème de l'axe parallèle) facilite grandement le calcul du moment d'inertie par rapport à un axe quelconque. Soit J_0 le moment d'inertie par rapport à un axe passant par le centre de masse et J le moment d'inertie par rapport à un autre axe, parallèle au premier et à une distance d de celui-ci. Alors ce théorème stipule que:

$$\boxed{J = J_0 + Md^2}$$

Comme exemple d'application du théorème de l'axe parallèle, calculons le moment d'inertie d'une tige de longueur L par rapport à un axe perpendiculaire à la tige et passant par l'une de ses extrémités. On trouve alors:

$$J = M\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \frac{1}{12} ML^2$$

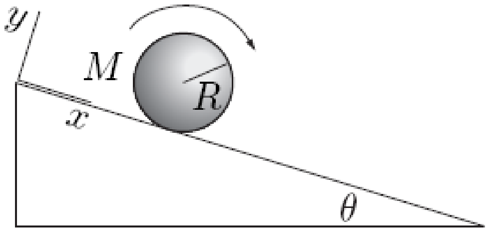
Exercice d'application:

Un volant est assimilable à un cylindre homogène de masse m=400g et de rayon R=0,4m. Calculer son énergie cinétique lorsqu'il tourne autour de son axe à 1500 tours par minute.

Réponse: Ec=394,4J

4. THEOREME DE KOENIG : EXEMPLE : OBJET SUR UN PLAN INCLINE

Considérons le mouvement d'un objet circulaire (une sphère, un cylindre ou un anneau) en roulement sur un plan incliné, tel qu'illustré sur la figure ci-dessous.



Si l'objet roule sans glisser, sa vitesse de translation et sa vitesse angulaire de rotation sont reliées par la contrainte v = ωR.

L'énergie cinétique de l'objet, d'après le théorème de Koenig, est la somme de l'énergie cinétique du centre de masse (l'énergie cinétique de translation $\frac{1}{2}mv^2$) et de l'´energie cinétique par rapport au centre de masse (l'énergie cinétique de rotation $\frac{1}{2}J\omega^2$). L'énergie cinétique totale est donc:

$$\boxed{Ec = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2}$$

III. Théorème de l'énergie cinétique.

1. RAPPEL

La variation d'une grandeur physique G associée à un système entre l'état initial i et l'état final f est notée: $\Delta G = G_f - G_i$

2. ÉNONCE

La variation de l'énergie cinétique d'un système entre deux instants t_i et t_f est égale à la somme algébrique des travaux de toutes les forces et couples qui sont appliqués à ce système entre les instant t_i et t_f.

Translation $\Delta Ec = Ec_f - Ec_i = \frac{1}{2}mv_f^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = \sum W(\vec{F})_{appliquées}$

Rotation $\Delta Ec = Ec_f - Ec_i = \frac{1}{2}J\omega_f^2 - \frac{1}{2}J\omega_i^2 = \sum W(\vec{F})_{appliquées}$

3. APPLICATIONS DU THEOREME

1. Une pierre est jetée vers le haut avec une vitesse v_o = 10 m.s^{-1}, on néglige toutes les forces autres que le poids de la pierre.
   - Calculer la hauteur h_1, où se trouvera la pierre lorsque sa vitesse sera de 6 m.s^{-1}.
   - Quelle sera la hauteur maximale atteinte par la pierre ?

2. Étude d'un plan incliné, un corps de masse m = 500 g est abandonné sans vitesse initiale sur un plan incliné faisant un angle de 30 ° par rapport à l'horizontal, sans vitesse initiale.

- Quelle distance doit parcourir le solide pour que sa vitesse soit de 2 $m.s^{-1}$?
- Quelle est sa vitesse lorsqu'il a parcouru 80 cm ?

Énergie mécanique totale

I. Énergie potentielle

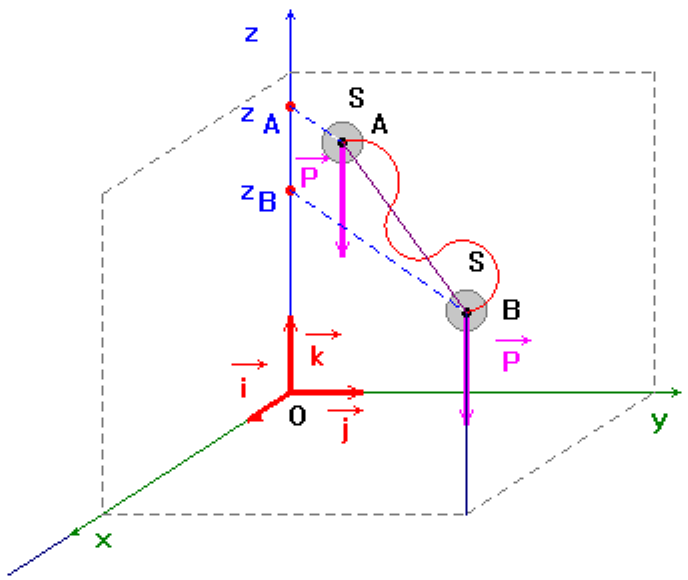
C'est la forme d'énergie que possède un système du fait de sa position par rapport au système avec lequel il est en interaction.

Exemples : l'énergie potentielle de pesanteur (interaction solide-Terre) et l'énergie potentielle élastique (interaction entre les spires ou les différentes parties du système).

L'énergie potentielle tient son nom de la possibilité, de la potentialité, qu'à un système de fournir de l'énergie lorsqu'il possède une énergie potentielle.

1. Énergie potentielle de pesanteur

a) Expression



Le travail du poids ne dépend pas du chemin suivi pour aller de A vers B. Avec un axe oz orienté vers le haut, on écrit : $W_{AB}(\vec{P}) = m\,g\,(z_A - z_B) = mgz_A - mgz_B$

La relation du travail peut s'écrire: $W(\vec{P}) = Ep_B - Ep_A$ en posant : $Ep_A = mgz_A + cte$ et $Ep_B = mgz_B + cte$

Cette constante représente la valeur de l'énergie potentielle de pesanteur à l'état de référence

L'énergie potentielle de pesanteur en un point d'altitude z est donnée par la relation: $\boxed{Ep = mgz + cte}$

A la référence z_{ref}: $Ep(z_{ref}) = 0 \Rightarrow \boxed{cte = -mgz_{ref}}$

$$\boxed{Ep(z) = mg(z - z_{ref})}$$

L’énergie potentielle est définie à une constante près, ce qui n’importe peu, étant donné que l’on travail toujours avec des différences d’énergies potentielles ou simplement des différentielles.

En prenant comme altitude de référence l’origine des espaces, l ‘énergie potentielle en un point **M** de l’espace est donnée par la relation : $\boxed{Ep=mgz}$

Remarque :

Il est incorrect de parler de l'énergie potentielle de la bille. Il est indispensable de parler de l'énergie potentielle de la bille en interaction avec la Terre. Certains auteurs parlent aussi de l'énergie potentielle du système solide-Terre.

b) Application

Un solide de masse m=5kg se trouve à une altitude z=10m du sol. Calculer son énergie potentielle en prenant comme référence (g=10 N/kg):

1. Le sol
2. L’altitude z=15 m
3. Le fond d’un puits de 8 m de profondeur.

c) Variation de l’énergie potentielle de pesanteur

Considérons un corps de masse m en chute libre. Evaluons la variation de l’énergie potentielle.

$$\Delta Ep=(mgz_2+C)-(mgz_1+C)=mg(z_2-z_1)=-mg(z_1-z_2)=-W_{1\to2}(\vec{P})$$

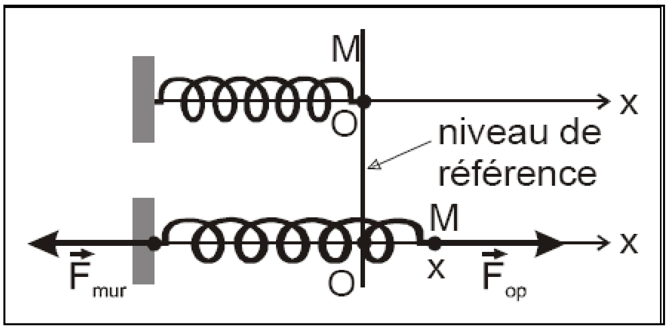
$$\Delta Ep=-W_{1\to2}(\vec{P})$$

Une force $\vec{F}$ est qualifiée de conservative si son travail ne dépend pas de la trajectoire empruntée pour aller d’un point A à un autre point B. on peut alors définir une énergie potentielle Ep uniquement fonction de la position et telle que:

$$\boxed{\Delta Ep=Ep(B)-Ep(A)=-W_{A\to B}(\vec{F})}$$

2. ENERGIE POTENTIELLE ELASTIQUE

a) cas d’un ressort



L'énergie potentielle élastique d'un ressort de raideur k, tendu ou comprimé d'une longueur x (repérée à partir du niveau de référence lequel correspond à son état libre) vaut:

$$\boxed{Ep = \frac{1}{2}kx^2}$$

b) cas d'un pendule de torsion

L'énergie potentielle élastique d'un couple de torsion de constante de torsion C, tordu d'un angle α (repérée à partir du niveau de référence lequel correspond à son état d'équilibre α=0) vaut:

$$\boxed{Ep = \frac{1}{2}C\alpha^2}$$

II. Énergie mécanique

Les deux grandes familles qui composent l'énergie mécanique sont l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. L'énergie cinétique d'un corps est liée à la vitesse de son déplacement. L'énergie potentielle dépend de la position d'un corps par rapport à sa position la plus stable. La vitesse d'un objet, ou sa positon, est naturellement repérée par les coordonnées de l'objet, elles mêmes sont définies par rapport à un référentiel précis.

1. Definition

Considérons un solide soumis à la force totale $\vec{F} = \vec{F_C} + \vec{F_{nc}}$ où:

- $\vec{F_C}$ est la résultante des forces conservatives décrivant l'énergie potentielle totale Ep.
- $\vec{F_{nc}}$ représente les forces non conservatives auxquelles on ne peut associer d'énergie potentielle (frottements…)

D'après le théorème de l'énergie cinétique, on a alors:

$$W_{AB}\left(\vec{F}\right) = W_{AB}\left(\vec{F}_C\right) + W_{AB}\left(\vec{F}_{nc}\right) = Ec(B) - Ec(A) \text{ avec } W_{AB}\left(\vec{F}_C\right) = Ep(A) - Ep(B)$$

$$\Rightarrow \quad [Ec(B) + Ep(B)] - [Ec(A) + Ep(A)] = W_{AB}\left(\vec{F}_{nc}\right)$$

Il apparait ainsi une nouvelle quantité $Ec + Ep$ à laquelle on donne le nom d'énergie mécanique E.

L'énergie mécanique est la somme de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle (toutes formes d'énergie potentielle).

$$\boxed{E = Ec + Ep}$$

2. Conservation de l'energie mecanique

Un système non dissipatif est un système qui fait intervenir des forces conservatives (non dissipatives). D'après le théorème de l'énergie mécanique on a $W_{AB}\left(\vec{F}_{nc}\right) = 0$ d'où:

$$\boxed{\Delta E = Em(B) - Em(A) = 0} \Rightarrow \text{E=cte}$$

En absence de force dissipatives (force de frottement par exemple), un système vérifie le principe de conservation de l'énergie mécanique

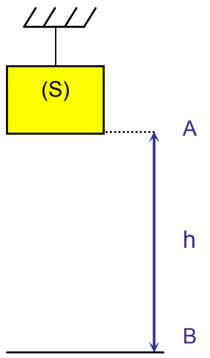
3. Non conservation de l'energie mecanique

Toutes les forces non conservatives sont appelées force dissipatives. Le travail de ces forces est toujours négatif et dépend du chemin suivi. Ces forces dans un système conduisent à des pertes d'énergie du système irréversibles: l'énergie mécanique ne se conserve pas.

$$\boxed{\Delta E = Em(B) - Em(A) = \sum W\left(\vec{F}_{dissipatives}\right)}$$

4. Applications

Exemple 1 : Une charge immobile (S) de masse m est suspendue à une hauteur h du sol.



La charge en A, en équilibre à une hauteur h, possède

- Une énergie potentielle: $Ep_A = mgh$
- Une énergie cinétique nulle (vitesse est nulle): $Ec_A = 0$ J
- Une énergie totale : $E_A = Ep_A + Ec_A = mgh$

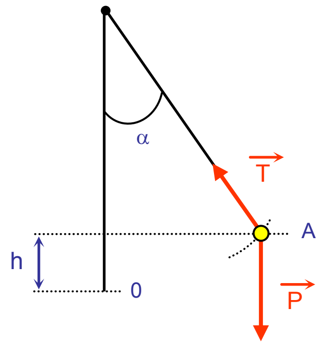
La charge en B, au niveau du sol, possède :

- Une énergie potentielle nulle (hauteur nulle): $Ep_B = 0$ J
- Une énergie cinétique : $Ec_B = ½.mV_B^2$
- Une énergie totale : $E_B = Ep_B + Ec_B = ½.mV_B^2$

L'énergie mécanique du système reste constante si l'on néglige toutes les forces autres que le poids, nous pouvons donc écrire

$$E_A = E_B = mgh = ½.mV_B^2$$

<u>Exemple 2:</u> Un pendule est constitué d'une bille de masse m fixée à l'extrémité d'un fil de masse négligeable et de longueur l. La bille est écartée de sa position d'équilibre, le fil fait un angle a avec la verticale, il est alors lâché sans vitesse initiale. Les seules forces retenues dans l'étude de ce pendule sont le poids et la tension du fil. A chaque instant, les déplacements de la bille sont perpendiculaires à la droite d'action de la force de tension du fil.



Si l'on considère que l'énergie potentielle est comptée à partir du point 0, c'est-à-dire la position la plus stable de la bille.

La bille en A, en équilibre, possède :

- Une énergie potentielle $Ep_A = mgh$
- Une énergie cinétique nulle (vitesse est nulle) $Ec_A = 0$ J
- Une énergie totale $E_A = Ep_A + Ec_A = mgh$

La grandeur h peut s'exprimer en fonction de la longueur du fil par la relation

$$h = l.(1-\cos\alpha)$$

Donc $$E_A = mgl(1 - \cos\alpha)$$

La charge en 0, passage du fil par la verticale, possède

- Une énergie potentielle nulle (hauteur nulle) $Ep_0 = 0$ J
- Une énergie cinétique $Ec_0 = ½.mV_0^2$
- Une énergie totale $E_0 = Ep_0 + Ec_0 = ½.mV_0^2$

L'énergie mécanique du système reste constante si l'on néglige toutes les forces autres que le poids et la tension du fil. Le travail de la tension du fil est nul car cette force est perpendiculaire aux déplacements de la bille, nous pouvons donc écrire

$$E_A = E_0 = mgl(1 - \cos\alpha) = ½.mV_0^2$$

Exercice d'applications

<u>Lancée verticale</u>

Une bille de masse m = 200 g est lancée d'une hauteur h_o de 1m50 verticalement vers le haut, avec une vitesse initiale $v_o = 5$ m.s^{-1}.

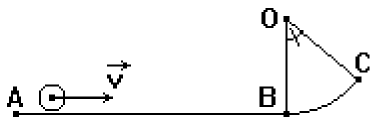
- Calculer l'énergie potentielle Ep_o de la bille au départ du lancer.

- A quelle altitude sa vitesse est-elle la moitié de sa vitesse initiale ?
- Quelle est l'altitude maximale atteinte par la bille ?
- Quelle est sa vitesse, lorsqu'elle retombe sur le sol ?

Dégradation de l'énergie mécanique

Une piste horizontale AB don la longueur est L = 1,5 m, se termine par une portion circulaire BC, de centre O, de rayon R = 2 m et d'angle au centre α = 50°.

On lance un petit objet S, de masse m = 100 g ; sa vitesse, lorsqu'il passe au point A est v_A=5m/s.

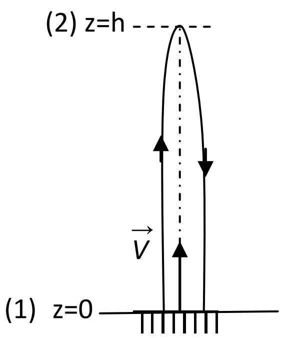


- Calculer la longueur totale de la piste (ABC).
- Déterminer l'altitude du point C (on pose $z_A = 0$).
- Déterminer les caractéristiques du vecteur vitesse $\vec{V}_C$ de l'objet lorsqu'il arrive au point C dans l'hypothèse où l'on néglige tous les frottements.
- En fait, on mesure la vitesse réelle $V'_C = 2{,}8$ m/s. Monter qu'il existe des frottements et déterminer la quantité d'énergie mécanique dégradée par les frottements. Que devient cette énergie dégradée ?

III. Transformation mutuelle de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle

1. Étude d'un exemple

Considérons un solide lancé verticalement avec une vitesse $\vec{v}$ et supposons les frottements négligeables. Le solide passe de la position (1) à la position (2).



- En (1) Ep=0 et $Ec = \frac{1}{2}mv^2$, comme E=cte toute l'énergie mécanique est sous forme cinétique.
- En (2) le solide s'arrête et rebrousse chemin Ec=0 et $Ep = mgh$, toute l'énergie mécanique est sous la forme potentielle.

L'énergie mécanique étant constante, Ep et Ec sont deux formes d'énergie qui se transforment mutuellement l'une en l'autre.

2. Barriere de potentielle – puits de potentielle

a) Exemple 1

Un skieur veut aller de A en C. En A sa vitesse st $\vec{v}_A$. il glisse de A en B. où s'arrêtera-t-il?

Supposons la piste verglacée (frottement négligeables) et que le skieur s'arrête en D.

$$E_1 = Ec_1 + Ep_1 = \frac{1}{2}m{v_A}^2 + mgz_A$$

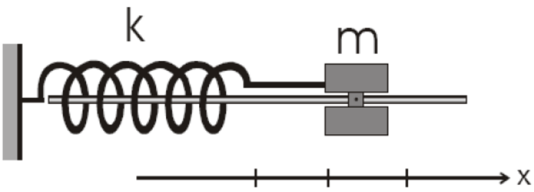
$$E_2 = Ec_2 + Ep_2 = 0 + mgz_D$$

$$\text{E=cte} \Rightarrow E_1=E_2 \Rightarrow \frac{1}{2}mv_A^{\ 2} + mgz_A = mgz - D \Rightarrow z_D = z_A + \frac{v_A^{\ 2}}{2g}$$

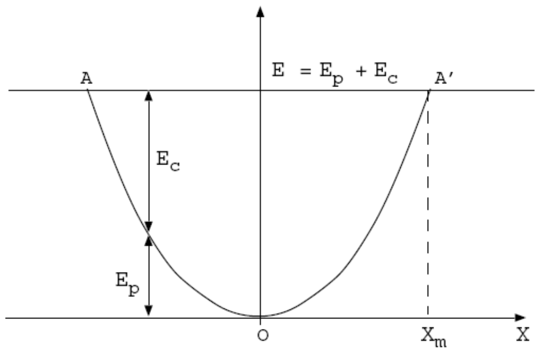
Le skieur ne peut pas aller au-delà du point D. la côte z_D représente donc une barrière de potentielle pour le skieur

b) Exemple 2

Un ressort parfait de raideur k est enfilé sur une tige horizontale. Une bille de masse m accroché au ressort coulisse sans frottement. On allonge le ressort d'une longueur x_m puis on l'abandonne à lui-même.



On peut représenter l'énergie potentielle en fonction de x.



E étant constant. $E = Ep + Ec = cte \Rightarrow Ec = E - Ep$ comme $Ec \geqslant 0$ on a toujours donc $Ep \leqslant E$; on contraint donc x à rester en certaines valeurs. Les états possibles du système sont des états liés. La bille est assujettie à osciller entre deux position $-x_m$ et $+x_m$: on dit qu'elle se trouve dans un puits de potentielle ou cuvette de potentielle.

Calorimétrie

Un système est, comme en mécanique, un objet ou un ensemble d'objets que l'on isole par la pensée. Ce qui ne fait pas partie de ce système s'appelle le milieu extérieur. La calorimétrie est l'étude de l'évolution du système en fonction des échanges d'énergie (travail et chaleur) avec le milieu extérieur.

I. Dégradation de l'énergie mécanique

1. Étude d'un exemple

Si un mobile roulant à vitesse constante (cas d'un cycliste) freine brutalement, la partie des roues en contact avec les patins s'échauffe: il y a dégradation de l'énergie mécanique et apparition de la chaleur. Cette apparition de chaleur correspond à la perte de l'énergie mécanique du cycliste.

$$|\Delta Em| = Q_{reçue}$$

2. Interpretation microscopique

L'élévation de température consécutive à l'apparition de la chaleur s'explique à l'échelle microscopique par l'augmentation du degré d'agitation des molécules. L'énergie mécanique perdue a été transférée aux molécules du système, cela se traduit par une élévation de température ou par un changement d'état à température constante si le corps est pur.

II. Mode de transmission de la chaleur

A l'échelle macroscopique, un transfert thermique s'effectue toujours du corps chaud vers le corps froid. On distingue trois modes de transfert :

1. Transfert thermique par conduction

Plaçons la pointe d'un long clou sur la flamme d'un bec Bunsen. Très rapidement, à l'autre extrémité, la tête du clou devient très chaude. Le transfert d'énergie calorifique se fait par conduction, sans transfert de matière.

La flamme a augmenté l'énergie cinétique de vibration des ions fer et l'énergie cinétique désordonnée des électrons libres. Cette agitation s'est propagée, par chocs successifs, depuis la pointe du clou, jusqu'à la tête.

2. Transfert thermique par convection

Les molécules d'air (dioxygène, diazote, etc.) présentes au dessus d'une plaque chauffante ou d'un radiateur s'échauffent et montent vers le plafond de la salle. Il y a une circulation d'air qui s'établit des parties chaudes de l'air vers les parties froides (la masse volumique de l'air diminue avec la température).

Cette circulation peut être rendue visible avec un peu de fumée (particules solides mais légères) placée sur le radiateur.

Le transfert d'énergie thermique se fait par convection, avec transfert de matière.

3. Transfert d'energie par rayonnement

Le Soleil transmet à la Terre une grande quantité d'énergie. Ce transfert d'énergie, qui se fait même dans le vide, est appelé rayonnement. Il est constitué d'ondes électromagnétiques s'étendant des rayons gamma (très dangereux) aux ondes Hertziennes, en passant par toutes les radiations visibles (du rouge au violet). Ce rayonnement solaire atteint le sol après avoir été en partie arrêté par l'atmosphère. Le sol en renvoie une partie sous forme de radiations infrarouges plus ou moins piégées par l'atmosphère contenant du gaz carbonique et de la vapeur d'eau (effet de serre). Ce sont ces radiations infrarouges qui réchauffent les corps qui les captent

III. Quantité de chaleur

L'expérience montre que lorsqu'on met en présence deux corps pris à des températures différentes, au bout d'un certain temps, leur température finit par devenir la même. Le corps chaud a donné de l'énergie thermique (calorifique) au corps froid.

L'apport d'énergie calorifique à un corps peut en fait, avoir deux principaux effets :

- accroissement de la température de ce corps, sans changement d'état physique.
- changement de l'état physique du corps sans variation de sa température.

Nous allons détailler ces deux effets.

1. Cas d'une variation de temperature

a) *Expression*

L'expérience montre que l'énergie thermique (ou quantité de chaleur) Q échangée avec l'environnement par une masse m de substance dont la température varie de $\theta_{initial}$ à θ_{final} peut s'écrire :

$$\boxed{Q = m\,c\,(\theta_{final} - \theta_{initial})}$$

Q est positif si la masse m s'échauffe (l'énergie interne augmente). Q est négatif si la masse m se refroidit.

Unités : Q est en joule (J), m est en kilogramme (kg), θ est en kelvin (K), c est la capacité thermique massique (ou chaleur massique) de la substance et s'exprime en $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$.

Remarque : Le produit mc s'exprime en $J\ K^{-1}$. On l'appelle capacité thermique de la totalité du corps étudié.

b) *Chaleur massique ou capacité thermique massique*

La chaleur massique C d'un corps est la quantité de chaleur qu'il faut fournir (ou prendre) à l'unité de masse de ce corps pour que sa température s'élève (ou s'abaisse) de 1 K (ou 1°C).

L'unité de chaleur massique est le $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ou $J.kg^{-1}.°C^{-1}$.

Corps	c ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	Corps	c ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
eau	$4,1855.10^3$	Aluminium	$0,92.10^3$
glace	$2,1.10^3$	Fer	$0,75.10^3$
eau vapeur	$1,9.10^3$	Air	1.10^3

Exercice : Quelle quantité de chaleur faut-il fournir à un vase métallique pesant 190 g pour élever sa température de 21 °C à 41 °C ? Dans l'intervalle considéré, la chaleur massique du métal est: 380 $J.kg^{-1}.K^{-1}$.

c) Capacité thermique calorifique - valeur en eau

Le produit mc s'appelle la capacité thermique C d'un corps : $C=m\times c$ (unité de C : $J.K^{-1}$)

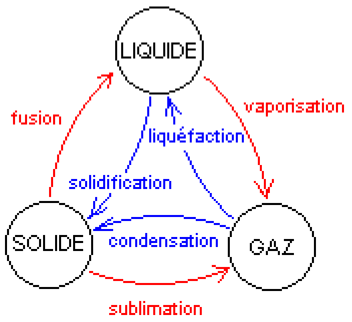
L'équivalent en eau (ou valeur en eau) d'un système est la masse d'eau µ échangeant la même quantité de chaleur avec l'extérieur quand il subit la même variation de température :

$$m.c.T = \mu.c_e.T \quad \Rightarrow \quad \mu = \frac{mc}{c_e}$$

2. Cas d'un changement d'etat

a) Diagramme de changement d'état

Les changements d'états portent des noms :



Un changement de l'état physique d'un corps pur est réalisé sous pression constante et à une température constante.

b) Chaleur latente de changement d'état

Si on a notre système qui échange de la chaleur avec l'extérieur, sa température peut rester constante : la chaleur sert à autre chose, par exemple à le faire changer d'état. La chaleur mise en jeu s'appelle alors chaleur latente.

La chaleur latente est la chaleur échangée avec l'extérieur au cours d'un changement d'état du système. On la note L.

$\boxed{Q = m.L}$ (L s'exprime en $J.kg^{-1}$)

Unités : Q est en joule (J), m est en kilogramme (kg), L est la chaleur latente massique de changement d'état et s'exprime en $J \times kg^{-1}$.

Q et L sont positifs pour une fusion, une vaporisation, une sublimation et négatifs pour une solidification, une liquéfaction, une condensation. De plus :

$L_{fusion} = - L_{solidification}$ $L_{vaporisation} = - L_{liquéfaction}$ $L_{sublimation} = - L_{condensation}$

Quelques valeurs de la chaleur latente massique de changement d'état :

La chaleur latente massique de fusion de la glace est :

$L_{fusion} = 335000\ J\ kg^{-1}$ à $\theta = 0$ °C et sous $p = 1{,}013 \times 10^{5}$ Pa.

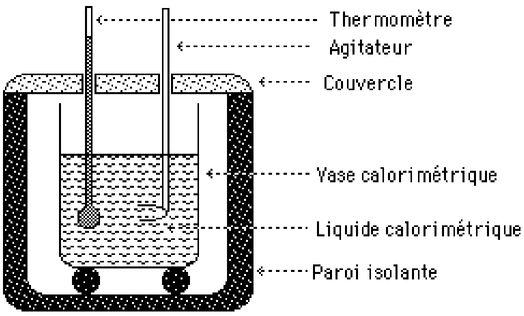
La chaleur latente massique de solidification de l'eau :

$L_{solidification} = - 335000\ J\ kg^{-1}$ à $\theta = 0$ °C et sous $p = 1{,}013 \times 10^{5}$ Pa.

IV. Détermination expérimentale des grandeurs calorimétriques

1. Calorimetre

Un calorimètre est une enceinte adiabatique (ne permet aucun échange de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur). Il sert à mesurer la quantité de chaleur échangée.



2. Principe de la methode des melanges

A l'équilibre thermique la quantité de chaleur perdue par le corps chaud est égale en valeur absolue à la quantité de chaleur reçue par le corps froid. $|Q_1| = |Q_2| \Rightarrow Q_1 + Q_2 = 0$

Généralisation

Soient n corps mis dans une enceinte adiabatique et ayant des températures différentes. A l'équilibre thermique on a: $\sum_{i=1}^{n} Q_i = 0$ ou $\left|\sum Q-reçue\right| = \left|\sum Q_{perdue}\right|$

3. APPLICATIONS

☞ Détermination de la capacité thermique d'un calorimètre:

Un calorimètre contient une masse m_1=250g d'eau. La température initiale de l'ensemble est θ_1=18°C. On ajoute une masse m_2=300g d'eau à la température θ_2=80°C.

1. Quelle serait la température d'équilibre thermique θ_e de l'ensemble si la capacité thermique du calorimètre et de ses accessoires était négligeable?

2. On mesure en fait une température d'équilibre thermique θ_e=50°C. Déterminer la capacité thermique C du calorimètre et de ses accessoires.

Données:
Chaleur massique de l'eau : c_e=4185 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Masse volumique de l'eau : µ=1000 $kg.m^{-3}$.

☞ Chaleur massique du plomb:

On sort un bloc de plomb de masse m_1=280g d'une étuve à la température θ_1=98°C. On le plonge dans un calorimètre de capacité thermique C=209$J.K^{-1}$ contenant une masse m_2=350g d'eau. L'ensemble est à la température initiale θ_2=16°C. On mesure la température d'équilibre thermique θ_e=17,7°C.
Déterminer la chaleur massique du plomb.

Données:
Chaleur massique de l'eau : c_e=4185 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Masse volumique de l'eau : µ=1000 $kg.m^{-3}$.

☞ Fusion d'un glaçon:

Un calorimètre de capacité thermique C=150$J.K^{-1}$ contient une masse m_1=200g d'eau à la température initiale θ_1=70°C. On y place un glaçon de masse m_2=80g sortant du congélateur à la température θ_2=-23°C.

Déterminer l'état final d'équilibre du système (température finale, masse des différents corps présents dans le calorimètre).

Données:
Chaleur massique de l'eau : c_e=4185 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Chaleur massique de la glace: c_g=2090 $J.kg^{-1}.K^{-1}$
Chaleur latente de fusion de la glace: L_f=3,34.10^5 $J.kg^{-1}$

V. Chaleur de réaction

1. Origine de cette energie.

Cette énergie représente la variation de l'énergie interne du système chimique lors de la transformation des réactifs en produits.

$$Q = \Delta E = U_{réactifs} - U_{produits}$$

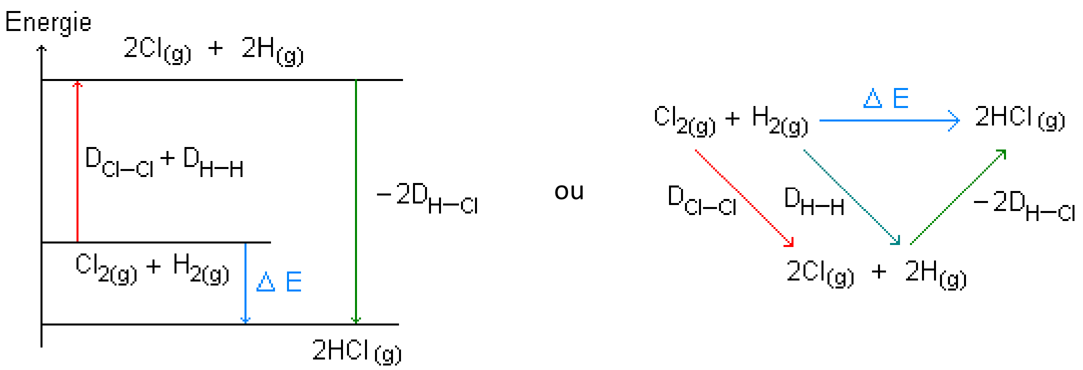
Cette énergie est stockée au niveau des liaisons intramoléculaires. Au cours d'une transformation chimique certaines liaisons sont rompues ce qui consomme de l'énergie et d'autres liaisons s'établissent ce qui libère de l'énergie. L'énergie transférée au cours de la transformation chimique est le bilan de ces énergies consommées et de ces énergies libérées.

2. Exemple de l'estimation de l'energie transferee: Synthese du chlorure d'hydrogene.

Toutes les espèces chimiques considérées sont à l'état gazeux.

L'équation de la réaction s'écrit $Cl—Cl_{(g)} + H—H_{(g)} \leftrightarrow 2H—Cl_{(g)}$

Pour passer des réactifs au produit, il faut rompre des liaisons Cl—Cl et H—H ce qui nécessite les énergies $D_{Cl—Cl}$ et $D_{H—H}$ et des liaisons H—Cl s'établissent ce qui libère l'énergie $D_{H—Cl}$. On pourra représenter ces échanges énergétiques en utilisant les diagrammes suivants:



Le bilan énergétique de la transformation s'écrit $Q = D_{Cl—Cl} + D_{H—H} - 2D_{H—Cl}$

Généralisation.

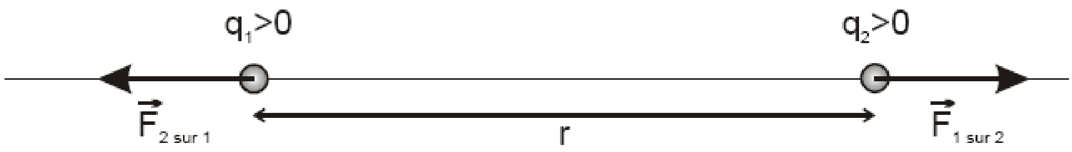
L'énergie transférée lors d'une transformation chimique ne mettant en jeu que des espèces gazeuses s'obtient en faisant le bilan énergétique des liaisons rompues et des liaisons établies au cours de cette transformation.

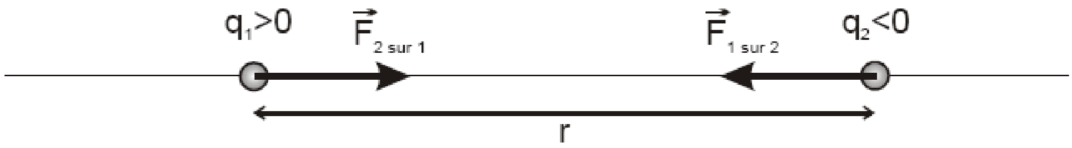
$$\Delta E = \sum E(\text{liaisons rompues}) - \sum E(\text{liaisons établies}$$

Force et champ électrostatiques

I. Forces électrostatiques: Loi de Coulomb

Toute charge électrique exerce une force électrostatique (à distance) sur toute autre charge: des charges de même signe se repoussent, des charges de signe contraire s'attirent.





- q_1 exerce $\vec{F}_{1\ sur\ 2}$ sur q_2; q_2 exerce $\vec{F}_{2\ sur\ 1}$ sur q_1

  D'après le principe des actions réciproques: $\vec{F}_{1\ sur\ 2} = -\ \vec{F}_{2\ sur\ 1}$. On notera: $F_{1\ sur\ 2} = F_{2\ sur\ 1} = F$

- Charles Auguste de Coulomb (1736-1806) a effectué une série de mesures (à l'aide d'une balance de torsion) qui lui ont permis de déterminer avec un certain degré de précision les propriétés de la force électrostatique exercée par une charge ponctuelle q_1 sur une autre charge ponctuelle q_2:
  - La force est radiale, c'est à dire dirigée selon la droite qui joint les deux charges ;
  - Elle est proportionnelle au produit des charges : attractive si elles sont de signe opposé, répulsive sinon ;
  - Enfin, elle varie comme l'inverse du carré de la distance entre les deux charges.
- Énoncé de la loi de Coulomb:

  La force qu'une charge q_1 exerce sur une charge q_2 se trouvant à la distance r de q_1 s'écrit:

$$\boxed{F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1 q_2|}{r^2}}$$

- $K = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ = 9.10^9 unités S.I (Nm^2C^{-2}) est constante de proportionnalité et ε_0 est une autre constante appelée **permittivité du vide**: ε_0 = 8,854.10^{-12} unités S.I. (Farad/m)

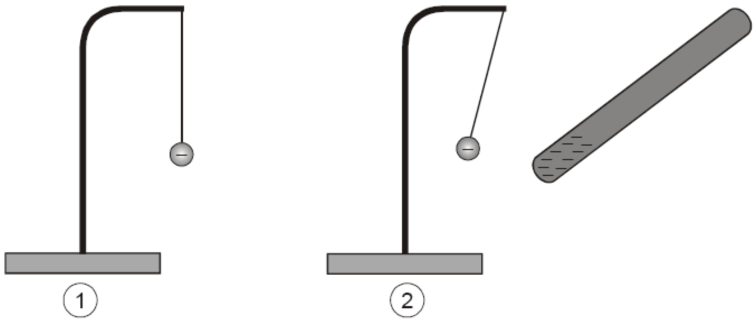
II. Notion de champ électrique

1. Experience fondamentale

Le pendule électrostatique est constitué par un fin fil isolant auquel est attachée une petite boule isolante très légère (formée par exemple de moelle de sureau). Il est accroché à un support pour qu'il puisse dévier dans tous les sens sous l'action de forces électriques.
Cette boule va être chargée négativement par contact avec un autre corps chargé négativement.
Deux cas se présentent:

- Il n'y a pas d'autre corps chargé à proximité du pendule. Celui-ci reste dans sa position verticale. La boule est en équilibre sous l'action de son poids et de la tension du fil. Il n'y a pas de force électrique s'exerçant sur elle.

- On approche un bâton d'ébonite dont l'une des extrémités a été chargée négativement en la frottant avec une peau de chat. Le pendule dévie par rapport à sa position verticale. La boule est en équilibre sous l'action du poids, de la tension du fil et de la force électrique exercée par les charges négatives du bâton d'ébonite.



2. Notion de champ electrique

L'approche du bâton d'ébonite chargé a modifié les propriétés électriques de la région dans laquelle se trouve le pendule:
En 1, cette région est telle que le pendule n'est pas soumis à une force électrique.
En 2, cette région est telle que le pendule est soumis à une force électrique.
Les physiciens décrivent cette propriété électrique d'une région de l'espace par la notion de champ électrique:
En 1, il ne règne pas de champ électrique dans la région du pendule.
En 2, il règne un champ électrique dans la région du pendule.
Ce champ électrique est créé par le bâton d'ébonite chargé.

3. Conclusions

- Un champ électrique règne dans une région de l'espace, si une charge y est soumise à une force électrique.
- Pour contrôler s'il règne un champ électrique dans une région, on y place une petite charge témoin, et on examine si elle est soumise à une force électrique ou non.
- Le pendule électrostatique chargé peut servir de charge témoin.
- À proximité d'un corps chargé règne un champ électrique. Tout corps chargé est donc source d'un champ électrique.

4. Remarques importantes

On distingue rigoureusement entre **charge source d'un champ électrique** et **charge témoin**:

- La charge témoin ne sert qu'à contrôler s'il règne ou non un champ électrique.
- La charge source crée le champ électrique. Dans ce champ peuvent se trouver une ou plusieurs charges témoin soumises à des forces électriques exercées par la charge source.
- La charge témoin crée bien sûr aussi un champ électrique. Comme elle est faible, son champ est négligé de sorte que sa présence ne modifie par le champ de la charge source.
- Le champ créé par une charge source existe même en absence de la charge témoin qui l'a mis en évidence.

5. Exemples

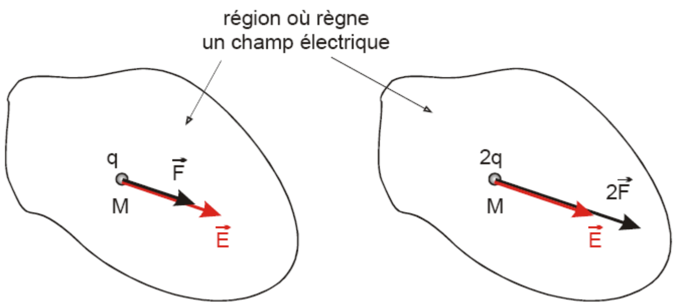
- Les électrodes fortement chargées d'une **machine de Whimshurst** créent un puissant champ électrique entre elles.
- La cloche d'un **générateur de Van der Graaf** crée un puissant champ électrique autour d'elle.

- Les **corps neutres** ne créent pas de champ électrique.
- Dans les **atomes**, chaque électron se déplace dans le champ électrique créé par le noyau électrique et par les autres électrons.
- Dans un **fil conducteur connecté aux pôles d'un générateur de tension** règne un champ électrique, responsable des forces électriques qui propulsent les électrons et créent ainsi le courant électrique dans le fil.

III. Vecteur champ électrique

Une charge témoin q > 0 est placée en un point M où règne un champ électrique. Elle subit une force électrique $\vec{F}$ qui dépend de la valeur de la charge q.
En fait, comme le suggère la loi de Coulomb, cette force est proportionnelle à la charge q!

Conséquence: $\frac{\vec{F}}{q}$ est constant au point M. On définit le vecteur champ électrique en M par: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$



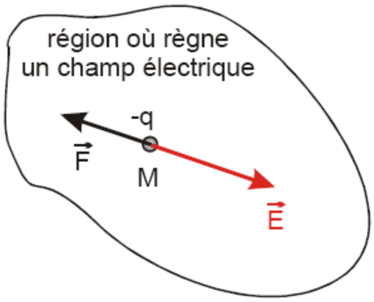
Caractéristiques du vecteur $\vec{E}$

- Intensité: $E = \frac{F}{|q|}$

Elle est numériquement égale à l'intensité de la force électrique qui s'exerce sur une charge témoin q = 1 C.

- Direction: la même que celle de la force électrique $\vec{F}$
- Sens: si q > 0: celui de la force électrique $\vec{F}$ et si q < 0: opposé à celui de la force électrique $\vec{F}$

Formule à retenir: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \Rightarrow \boxed{\vec{F} = q.\vec{E}}$



IV. Exemples de champ électrostatiques

1. Champ electrique cree par une charge ponctuelle Q (=charge source)

Quel est le vecteur $\vec{E}$ en un point M quelconque du champ créé par Q (M à la distance r de Q)?
On place en M une **charge test q > 0**:

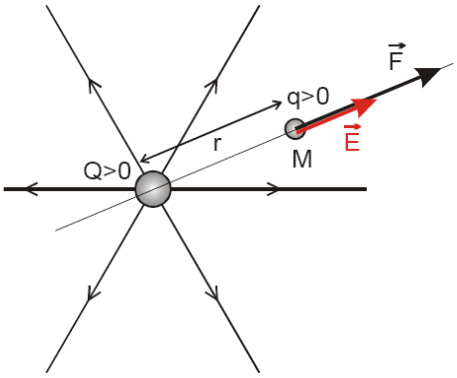
- Norme de $\vec{E}$

La force F subie par q dans le champ s'écrit: $F = |q| E$ (1)

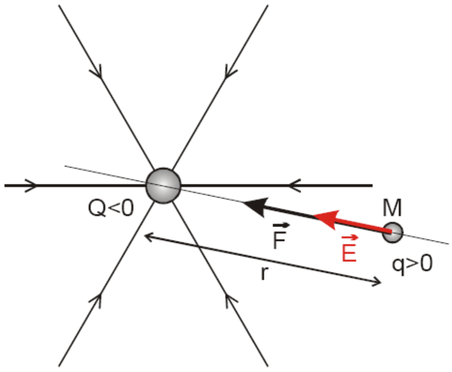
D'après la loi de Coulomb F s'écrit également: $F = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{|qQ|}{r^2}$ (2)

(1) et (2) $\Rightarrow$ Champ E au point M: $\boxed{E = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{|Q|}{r^2}}$ ou vectoriellement: $\boxed{\vec{E} = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{|Q|}{r^2}\vec{u}}$

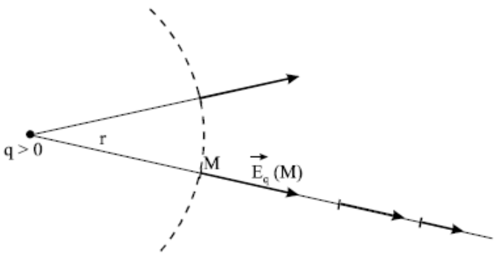
- Direction de $\vec{E}$: droite passant par la charge source et le point M
- Sens de E:
  - Q > 0: $\vec{E}$ centrifuge

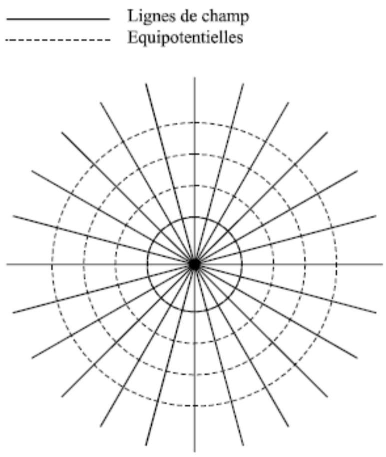


  - Q < 0: $\vec{E}$ centripète



Remarque: le champ électrique diminue en fonction de r. Tous les points à la surface de la sphère centrée sur la charge ponctuelle ont même valeur du champ. Ils constituent une ligne équipotentielle (nous reviendrons sur cette notion)

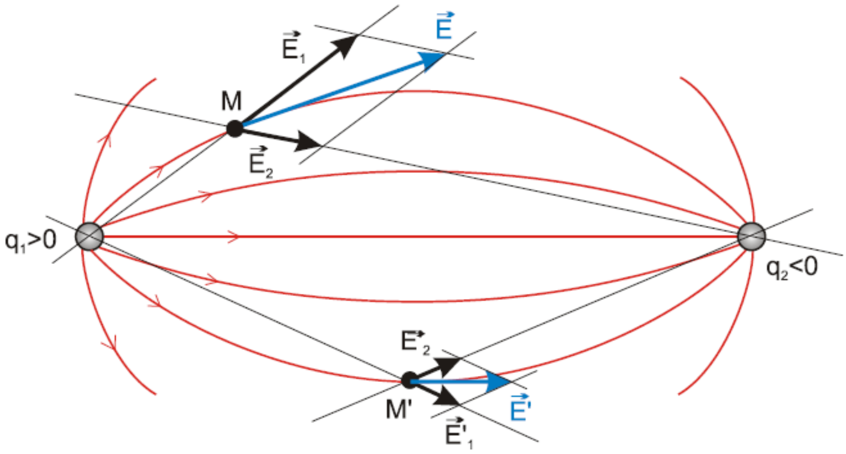




2. Champ electrique cree par deux charges ponctuelles de meme valeur absolue et de signe contraire

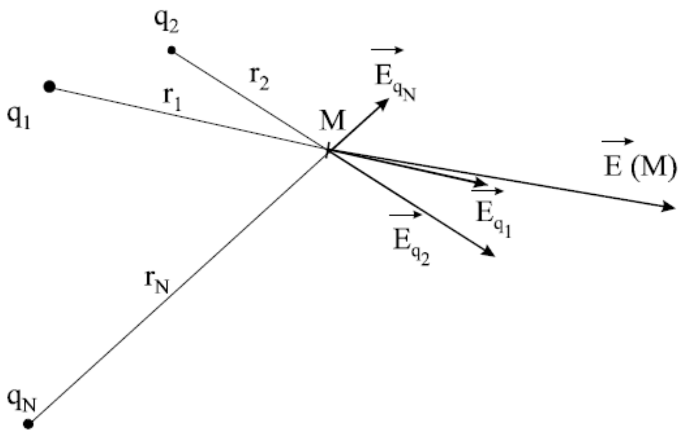
Soient deux charges ponctuelles q_1 et q_2 placées respectivement en M_1 et M_2 distants de r_1 et r_2 d'un point M. Au point M considéré, on représente le champ $\vec{E}_1$ créé par q_1, et le champ créé par $\vec{E}_2$. Le champ résultant est donné par la somme vectorielle des champs qui se superposent:

$$\vec{E}=\vec{E}_1+\vec{E}_2$$



3. Champ cree par un ensemble de charges

On considère maintenant n particules de charges électriques q_i, situées en des points P_i : quel est le champ électrostatique créé par cet ensemble de charges en un point M ?



La réponse n'est absolument pas évidente car l'on pourrait penser que la présence du champ créé par des particules voisines modifie celui créé par une particule. En fait, il n'en est rien et l'expérience montre que la force totale subie par une charge q située en M est simplement la superposition des forces élémentaires,

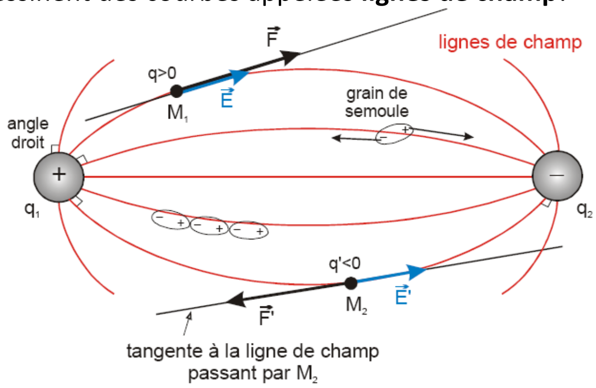
$$\vec{F}=\sum_{i=1}^{n}\vec{F}_i=\sum_{i=1}^{n}q\,\vec{E}_i=q\sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i=q\,\vec{E} \text{ où } \boxed{\vec{E}=\sum_{i=1}^{n}\vec{E}_i=\vec{E}_1+\vec{E}_2+\ldots+\vec{E}_n}$$

Application:
Soit un carré ABCD et O son centre. La charge q=1µC placée en A crée en O le champ électrostatique $E_o=2.10^3$ V/m. déterminer le champ électrostatique créé en O lorsqu'on place en A, B, C, D la même charge q=1µC.

V. Spectres électriques -Lignes de champ

1. Experience

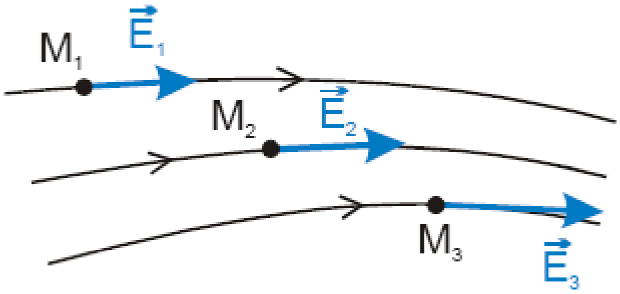
Dans l'espace de deux électrodes chargées l'une positivement ($q_1 > 0$), l'autre négativement ($q_2 < 0$), on dispose de l'huile contenant des grains de semoule.
Observation: Les grains dessinent des courbes appelées **lignes de champ**!

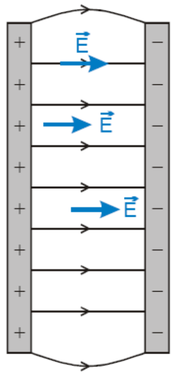


Interprétation:
Sous l'influence du champ créé par les charges q_1 et q_2, les grains de semoule sont polarisés. Ainsi chaque grain devient un dipôle électrique dont les charges sont soumises à une force électrique exercées par q_1 et q_2. Ces forces ont pour effet d'orienter le grain parallèlement aux forces électriques.
Conclusion:
Les lignes de champ indiquent en tout point du champ la direction des forces électriques et donc la direction du vecteur champ électrique $\vec{E}$.

2. Lignes de champ electrique

Définition:
On appelle ligne de champ une ligne qui, en chacun de ses points, est tangente au vecteur champ électrique $\vec{E}$ en ce point.
Propriétés des lignes de champ :
- Les lignes de champ ne se coupent jamais.
- Les lignes de champ sont orientées dans le sens du champ électrique $\vec{E}$
- La direction du champ $\vec{E}$ en un point est tangente à la ligne de champ
- L'intensité du champ, notée E, est proportionnelle à la densité des lignes de champ. ($E_1 < E_2 < E_3$)
- Si le champ électrique est créé par des **conducteurs** chargés, les lignes de champ partent et entrent perpendiculairement à ces conducteurs.





Remarque:
La figure des lignes de champ est une représentation du champ. Elle est encore appelée **spectre électrique**.

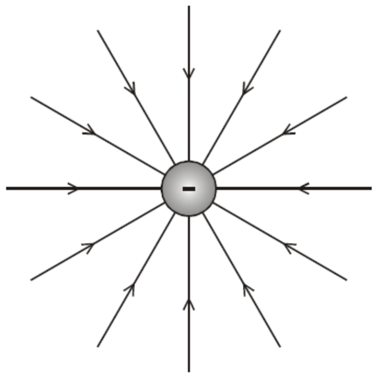
3. Exemples de spectres electrique

Champ créé par un condensateur chargé

Un condensateur est constitué de deux plaques parallèles rapprochées chargées l'une positivement l'autre négativement, et avec des charges de même valeur absolue.
A l'exception des régions aux bords, les lignes de champ sont parallèles, perpendiculaires aux plaques, et partout de même densité
$\Rightarrow$ même vecteur $\vec{E}$ en tout point du champ: le champ est **uniforme**!

Remarque:* $\vec{E}$ *est toujours dirigé dans le sens des potentiels décroissants.

Champ créé par une charge ponctuelle



Le champ est **radial**.

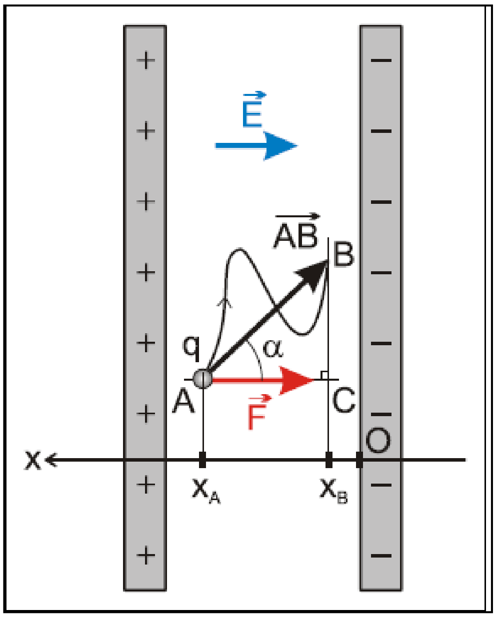
Travail de la force électrostatique

I. Travail de la force électrique

1. Expression mathematique dans le cas du deplacement d'une charge positive

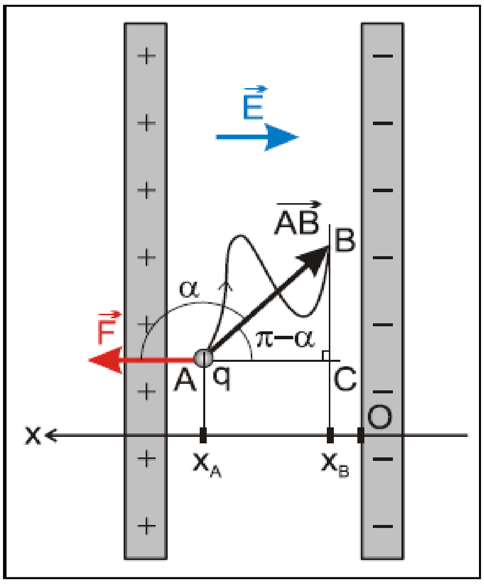
Une charge q > 0 est transportée de A vers B dans le champ uniforme d'un condensateur plan. (Pour que ce déplacement se fasse il faut bien sûr qu'il y ait des forces extérieures appropriées qui agissent sur q!).

Considérons le repère d'axe Ox (parallèle au champ électrique $\vec{E}$ et orienté dans le sens opposé à $\vec{E}$
A = point initial = point de départ; B = point final = point d'arrivée.
Le champ est constant. La force électrique est donc constante au cours du déplacement, donc son travail est indépendant du chemin suivi.



$$\begin{aligned} W(\vec{F}) &= \vec{F}\cdot\overrightarrow{AB} \\ &= F\cdot AB\cdot\cos\alpha \\ &= qE\cdot AB\cdot\cos\alpha \\ &= qE\cdot AC \\ &= qE\cdot(x_A - x_C) \\ &= qE\cdot(x_i - x_f) \\ &= -qE\cdot\Delta x \end{aligned}$$

2. Expression mathematique dans le cas du deplacement d'une charge negative



$$\begin{aligned} W(\vec{F}) &= \vec{F}\cdot\overrightarrow{AB} \\ &= F\cdot AB\cdot\cos\alpha \\ &= |q|E\cdot AB\cdot\cos\alpha \\ &= -|q|E\cdot AB\cdot\cos(\pi-\alpha) \\ &= qE\cdot AB\cdot\cos(\pi-\alpha) \qquad \text{car } q=-|q|<0 \\ &= qE\cdot AC \\ &= qE\cdot(x_A - x_C) \\ &= qE\cdot(x_i - x_f) \end{aligned}$$

L'expression mathématique est la même que pour la charge positive: $W(\vec{F})=-qE\Delta x$

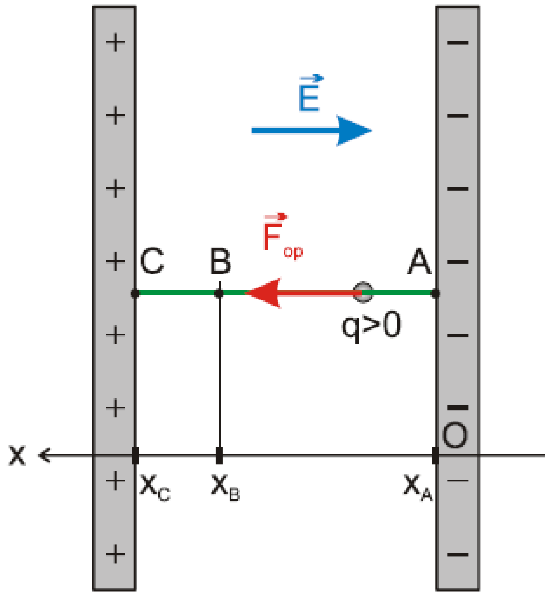
3. GENERALISATION

Le travail de la force électrique est: $\boxed{W(\vec{F})=q\vec{E}.\vec{AB}}$

II. Énergie potentielle d'une charge q placée dans un champ électrique uniforme

1. VARIATION DE L'ENERGIE MECANIQUE D'UNE CHARGE DEPLACEE DANS UN CHAMP ELECTRIQUE UNIFORME

Considérons une charge q > 0 déplacée (à vitesse constante) par une force d'un opérateur de la plaque négative d'un condensateur chargé vers la plaque positive.



* Système: Condensateur (portant les charges +Q et –Q) + charge q

* Forces extérieures:

- Force de l'opérateur opposée à la force électrique : $\vec{F}=\vec{F}_{op}=-\vec{F}$
- Le poids de la charge est négligé.
- On suppose que l'espace entre les plaques est vide d'air de sorte qu'il n'y a pas de force de frottement

* Variation de l'énergie mécanique du système:

$$\Delta E=\sum W_{Fext}\Rightarrow \Delta E=W(\vec{F}_{op})=-W(\vec{F})=qE.\Delta x=qEx_B>0 \text{ (q > 0)}$$

L'énergie acquise s'appelle **énergie potentielle électrique**.

2. DEFINITION

L'énergie potentielle électrique dans un champ électrique uniforme s'exprime par la relation:

$$\boxed{Ep=qEx}$$

3. REMARQUES

- En A: x = 0 ⇒ Ep = qEx_A = 0 (minimum)

Le niveau de référence pour l'énergie potentielle électrique est sur la plaque négative.

- En C: $x = x_C$ (maximum) ⇒ $Ep = qEx_C$ (maximum)
- L'axe Ox est toujours parallèle à $\vec{E}$ et orienté dans le sens opposé à $\vec{E}$. L'origine O détermine le niveau de référence.
- Pour $q < 0$, la formule est la même:

En A $Ep = 0$ (maximum); en B $Ep = qEx_B < 0$; en C $Ep = qEx_C < 0$ (minimum)

III. Potentiel électrique

1. Definition

Le potentiel V d'un point du champ est égal à l'énergie potentielle Ep que posséderait une charge témoin de +1 C placée en ce point.

$$V = \frac{Ep}{q}$$

Cette définition est valable pour un champ électrique quelconque.

2. Unite S.I. pour le potentiel electrique: le volt (V)

Si Ep = 1 J et si q = 1 C, alors V = 1 J/C = 1 volt = 1 V

3. Potentiel d'un point d'un champ uniforme

Comme Ep=qEx, le potentiel d'un point d'abscisse x s'écrit:

$\boxed{V=Ex}$ (formule à connaître)

V ne dépend que de la position du point et du champ électrique.

4. Nouvelle unite pour l'intensite du champ electrique E: le volt/metre

Dans un champ uniforme $E = \frac{V}{x}$: si V = 1 V, et si x = 1 m, alors E = 1 V/m

Montrer que 1 V/m = 1 N/C

5. Nouvelle expression pour l'energie potentielle electrique

$\boxed{Ep=qV}$ (Formule à connaître)

6. Nouvelle unite pour l'energie: l'electronvolt

Si $q = e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ C, et si V = 1 V, alors Ep= 1 eV = 1 électron-volt

$1\ eV = 1\ e\cdot1\ V = 1{,}6\cdot10^{-19}\ C\cdot1\ V = 1{,}6\cdot10^{-19}\ J$

7. Remarque

Dans un champ uniforme, l'axe Ox est dirigé toujours dans le sens des potentiels croissants.

IV. Différence de potentiel électrique : tension électrique

1. Definitions

Lorsqu'une charge se déplace d'un point initial A de potentiel $V_i = V_A$ vers un point final B de potentiel $V_f = V_B$, alors la **différence de potentiel** entre le point final et le point initial est:

$$\Delta V=V_f - V_i$$

Une différence de potentiel est encore appelée **tension électrique**.

La **tension entre A et B** est notée: $U_{AB}=V_A - V_B$

On a évidemment: $U_{BA}=V_B - V_A=-U_{AB}$

Souvent une parle de la **tension électrique aux bornes d'un appareil électrique**: il s'agit alors de la différence de potentiel prise positivement: $U = |\Delta V| > 0$

Sur les schémas, les tensions sont représentées par des flèches allant du potentiel moins élevé vers le potentiel plus élevé.

2. NOUVELLE EXPRESSION POUR LE TRAVAIL DE LA FORCE ELECTRIQUE

Dans un champ uniforme:

$$W(\vec{F})=-q\,E.\Delta x=-qE(x_f-x_i)=-q(Ex_f-Ex_i)=-q\Delta V$$

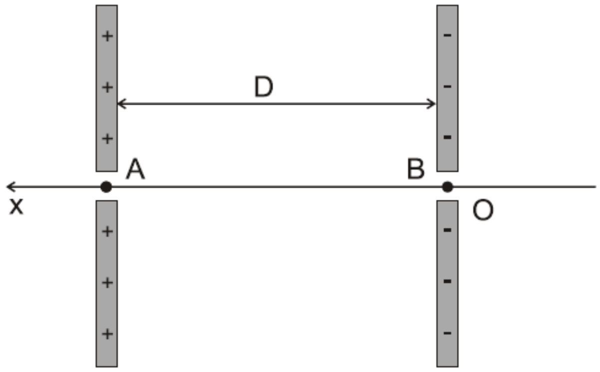
$$\boxed{W_{AB}(\vec{F})=q(V_A-V_B)}$$

Nous admettons que cette expression est valable également dans des champs non uniformes.

$W_{AB}(\vec{F})=q(V_A-V_B)=\vec{E}.\overrightarrow{AB} \Rightarrow \boxed{V_A-V_B=\vec{E}.\overrightarrow{AB}}$

Exercice d'application 1

Une particule α (noyau d'hélium), produite par une source radioactive, est émise au voisinage du point A avec une vitesse initiale négligeable.



1) Quelle tension U_{AB} = U faut-il appliquer entre les plaques distantes de D = 20 cm, pour que la vitesse des particules en B soit v = 10^3 km/s ? ($1{,}03\cdot10^4$ V)
2) Calculer la vitesse des particules à mi-chemin entre A et B. ($7{,}07\cdot10^5$ m/s)
3) Donner les caractéristiques du champ électrique $\vec{E}$ entre les plaques. ($5{,}16\cdot10^4$ V/m)
4) Quelle est en J, puis en eV, l'énergie cinétique d'une particule en B ? ($3{,}30\cdot10^{-15}$ J; $2{,}06\cdot10^4$ eV)
5) Calculer le potentiel d'un point situé à 5 cm, à 12 cm, à 18 cm de la plaque A. Calculer l'énergie potentielle d'une particule α en ces points. (5 cm: $7{,}74\cdot10^3$ V; $1{,}55\cdot10^4$ eV)

On donne : $q_\alpha = 2e = 3{,}2\cdot10^{-19}$ C ; $m_\alpha = 6{,}6\cdot10^{-27}$ kg

Application 2

Même exercice avec des électrons ayant en A une vitesse initiale de $6{,}6\cdot10^7$ m/s dirigée vers la plaque B.

On donne : $q_{électron} = -e = -1{,}6\cdot10^{-19}$ C; $m_{électron} = 9{,}1\cdot10^{-31}$ kg

Réponses:

a) $1{,}24\cdot10^4$ V; b) $4{,}67\cdot10^7$ m/s; c) $6{,}19\cdot10^4$ V/m; d) $4{,}55\cdot10^{-19}$ J; 2,84 eV;

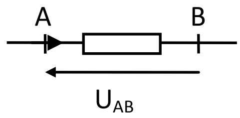
e) 5 cm: $9{,}29\cdot10^3$ V; $9{,}29\cdot10^3$ eV

Énergie électrique mise en jeu dans un circuit électrique

I. ÉCHANGES ENERGETIQUES DANS UN DIPOLE PASSIF (RECEPTEUR)

1. Convention récepteur

On étudie les dipôles passifs grâce à la convention récepteur.



Dans une portion de circuit ne comportant pas de générateur, le courant circule dans le sens des potentiels décroissants.

2. *Énergie électrique reçue par un dipôle passif*

Si pendant un temps t, une charge q entre en A (potentiel V_A) et sort en B (potentiel V_B), l'énergie potentielle électrique diminue.

- En A l'énergie potentielle électrique est qV_A
- En B l'énergie potentielle électrique est qV_B.
- Pendant le temps considéré, les échanges électriques ont perdu l'énergie électrique qV_A-qV_B. Cette énergie perdue par les charges en mouvement se dissipe dans le dipôle et elle représente l'énergie reçue par le dipôle pendant le temps t.

$$E_{reçue} = q\left(V_A - V_B\right) = qU_{AB} \text{ puisque } q = It \text{ nous aurons } E_{reçue} = U_{AB}It$$

$$\boxed{E_{reçue} = UIt \left| \begin{array}{ll} U(V) & volt \\ I(A) & ampère \\ t(s) & seconde \\ E(J) & joule \end{array} \right.}$$

NB: L'énergie reçue par le dipôle est égale au travail des forces électrostatiques s'appliquant sur les charges en mouvement.

$$W\left(\vec{f}\right) = -ne\left(V_A - V_B\right) = q\left(V_A - V_B\right) = E_{reçue}$$

3. *Puissance reçue par un dipôle passif*

En régime continu, la puissance reçue par un dipôle passif est définie comme l'énergie reçue par unité de temps.

$$\mathscr{P}_{reçue} = \frac{E_{reçue}}{t} \quad E_{reçue} = UIt \Rightarrow \mathscr{P}_{reçue} = \frac{UIt}{t} = UI$$

$$\boxed{\mathscr{P}_{reçue} = UI \left| \begin{array}{l} U(V) \\ I(A) \\ P(W) \end{array} \right.}$$ avec W symbole du Watt

La puissance reçue par un dipôle AB est le produit de l'intensité $I_{AB} = I$ qui le traverse par la tension à ses bornes $U_{AB} = U$.

II. Applications

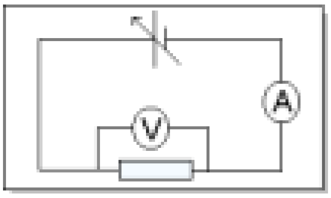
1. *Conducteur ohmique (récepteur passif)*

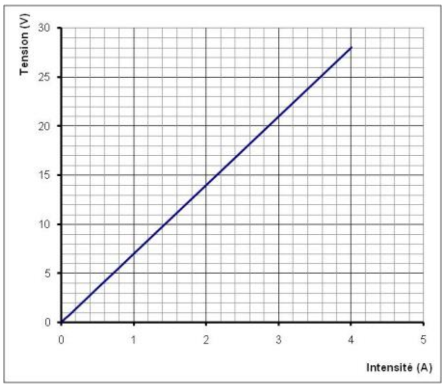
a. *Définition de l'effet Joule*

On appelle effet Joule l'effet thermique dû au passage du courant électrique dans les conducteurs électriques.

b. *Loi d'Ohm pour un conducteur ohmique*

La loi d'ohm pour un conducteur ohmique s'exprime par la relation $U = RI$. Pour un conducteur filiforme $R = \frac{\rho l}{s}$ (ρ: résistivité (Ωm^{-1}); l:longueur du fil (m) et s: section du fil (m²)).





Exemple: $U = 7 \times I$

c. *Loi de Joule*

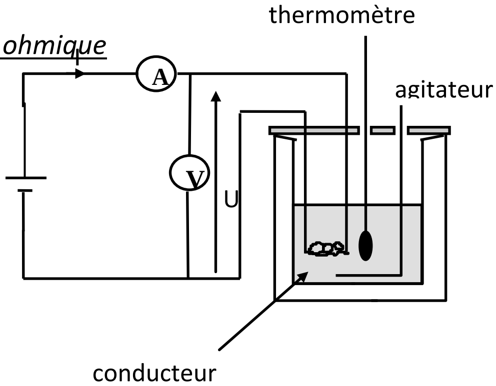
Dans un conducteur ohmique toute l'énergie électrique reçue par le dipôle est restituée au milieu extérieur sous forme de chaleur.

$$\boxed{\left(\begin{array}{c} Energie\ reçue\ par \\ le\ conducteur\ ohmique \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c} Energie\ thermique\ fournie \\ au\ milieu\ extérieur\ (chaleur) \end{array}\right)}$$

d. *Échanges énergétiques dans un conducteur ohmique*

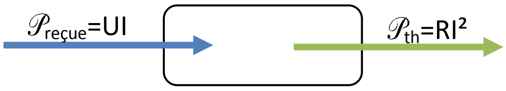
$$E_{reçue} = UIt = (RI)It = RI^2t = Q_{fournie}$$

$$\boxed{E_{reçue} = Q_{fournie} = UI^2t}$$



On définie la puissance thermique $\mathscr{P}_{th}$ comme étant l'énergie thermique dissipée par unité de temps.

$$\mathscr{P}_{th} = \frac{Q_{fournie}}{t} = \frac{RI^2t}{t} = RI^2 \Rightarrow \boxed{\mathscr{P}_{th} = RI^2}$$



NB: On retient l'expression suivante de la puissance.

$$U = RI \Rightarrow I = \frac{U}{R} \text{ d'où } \mathscr{P}_{th} = RI^2 = R\left(\frac{U}{I}\right)^2 = \frac{U^2}{R} \Rightarrow \boxed{\mathscr{P}_{th} = \frac{U^2}{R}}$$

Application:

Un fer à repasser porte les indications suivantes: 1200W; 220V.

a) Que signifient ces indications?
b) Calculer l'intensité du courant dans la résistance de chauffage lorsque le fer fonctionne.
c) Calculer la valeur de cette résistance.
d) Calculer l'énergie consommée lors d'une séance de remplissage de 40 minutes (l'exprimer en Joule et en kWh).

Résolution:

a) Les indications signifient que lorsque l'appareil est branché sur une source de tension de 220V, il reçoit une puissance de 1200W. Ces valeurs sont dites nominales.

b) $\mathscr{P}_{reçue} = UI \Rightarrow I = \frac{\mathscr{P}}{U} = \frac{1200}{220} = 5{,}45\ A$

c) $U = RI \Rightarrow R = \frac{U}{I} = \frac{220}{5{,}45} = 40{,}3\ \Omega$

d) $E = UIt = \mathscr{P} \times t = 1200 \times (40 \times 60) = 2{,}88.10^6 J$

40 min = $\frac{2}{3}$ h; $E = 1200 \times \frac{2}{3} = 800\ Wh = 0{,}8\ kWh$

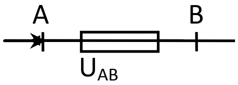
2. Récepteur (récepteur actif)

a. Définition d'un récepteur

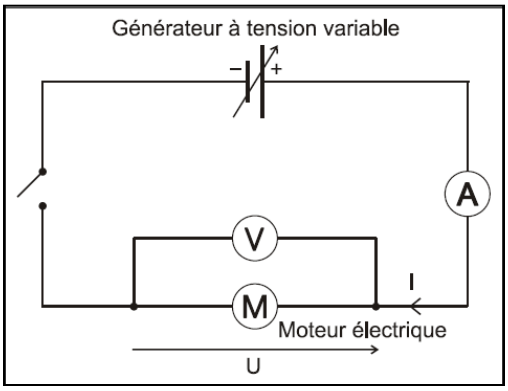
Un récepteur est un dipôle dans lequel une partie de l'énergie électrique est transformée en une forme d'énergie autre que l'énergie thermique. Exemple: un moteur (énergie mécanique), un électrolyseur (énergie chimique).

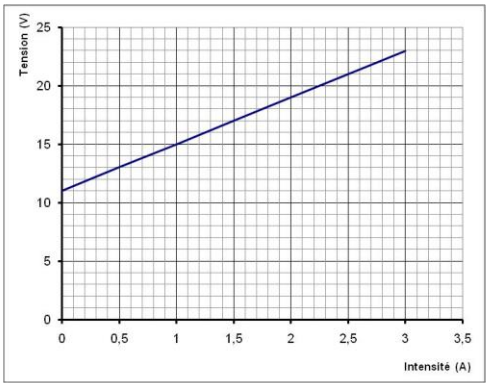
b. Loi d'ohm pour un récepteur

Dans un récepteur le courant circule dans le sens des potentiels décroissants.



La caractéristique intensité-tension d'un récepteur est une droite de coefficient directeur positif et ne passant pas par l'origine.





Exemple: $U = 11 + 4 \times I$

$$\boxed{U = e' + rI}$$

e'(V): force contre électromotrice (f.c.é.m.) et r(Ω): résistance interne du récepteur.

c. *Échanges énergétiques dans un récepteur*

$E_{reçue} = UIt$ et puisque $U = e' + rI$ pour un récepteur, alors $E_{reçue} = It(e' + rI) = e'It + rI^2t$

$$\boxed{E_{reçue} = (e'I + rI^2)t \Rightarrow E_{reçue} = E_u + E_{\text{th}}}$$

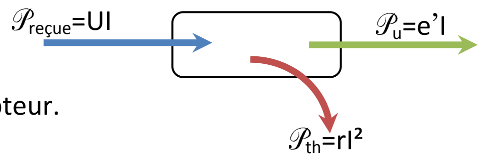
$E_u = e'It$: énergie utile (mécanique ou chimique)

$E_{\text{th}} = rI^2t$: énergie thermique perdue par effet joule.

$$\boxed{\mathscr{P}_{reçue} = UI = e'I + rI^2 \Rightarrow \mathscr{P}_{reçue} = \mathscr{P}_u + \mathscr{P}_{\text{th}}}$$

$\mathscr{P}_{reçue} = UI$: puissance reçue par le récepteur

$\mathscr{P}_u = e'I$: puissance utile.



$\mathscr{P}_{\text{th}} = rI^2$: puissance thermique dissipée dans le récepteur.

Cas particuliers:

- Pour un moteur bloqué $\mathscr{P}_u = e'I = 0 \Rightarrow e' = 0$.

- Pour un électrolyseur à anode soluble (électrode Cu dans une solution de Cu^{2+},SO_4^{2-}). Il n'apparaît pas d'énergie chimique, le processus se résume en un simple déplacement de matière de l'anode vers la cathode.

d. Rendement d'un récepteur

On définit le rendement d'un récepteur par le rapport entre la puissance utile qu'il produit (mécanique ou chimique) et la puissance qu'il reçoit.

$$\rho = \frac{\mathscr{P}_u}{\mathscr{P}_{reçue}} = \frac{e'I}{e'I + rI^2} = \frac{1}{1 + \frac{rI}{e'}} < 1$$

Application:

Un électrolyseur reçoit une puissance $\mathscr{P} = 120$ W lorsqu'il est alimenté par un courant d'intensité 10 A. La puissance thermique est $\mathscr{P}_{th} = 100$ W.

Déterminer la f.c.é.m. e' et la résistance interne.

Résolution:

$$\mathscr{P}_{th} = r'I^2 \Rightarrow r' = \frac{\mathscr{P}_{th}}{I^2} = \frac{100}{100} = 1\ \Omega$$

$$\mathscr{P}_{reçue} = UI \text{ avec } U = e' + rI \Rightarrow e' = \frac{\mathscr{P}_{reçue} - \mathscr{P}_{th}}{I} = \frac{120 - 100}{10} = 2\ V$$

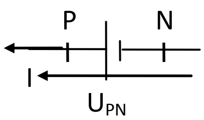
III. ÉCHANGES ENERGETIQUES DANS UN DIPOLE ACTIF (GENERATEUR)

1. Définition d'un générateur

Un générateur est un appareil qui produit de l'énergie électrique. Il effectue la transformation d'une forme d'énergie en énergie électrique. Exemple: pile, accumulateur.

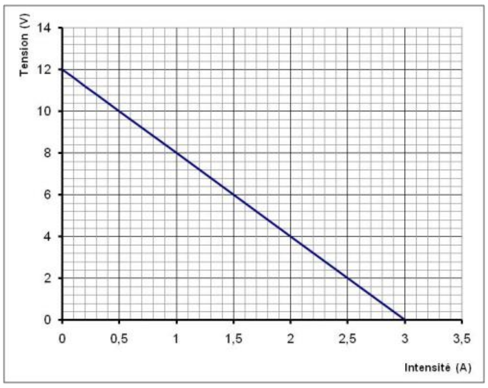
2. Convention générateur

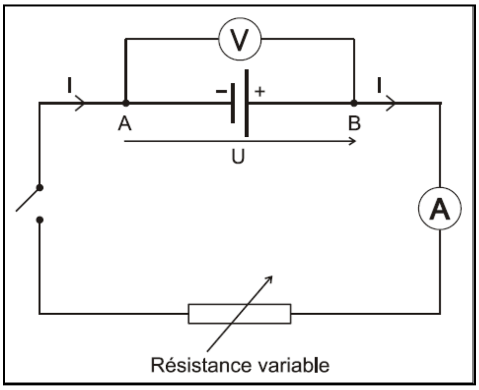
Dans un générateur le courant circule dans le sens des potentiels croissants.



3. Loi d'ohm pour un générateur

La caractéristique intensité-tension d'un générateur est une droite de coefficient directeur négatif et ne passant pas par l'origine.





Exemple: $U = 12 - 4 \times I$

$$\boxed{U_{PN} = e - rI}$$

e(V): force électromotrice ou f.é.m.

r(Ω): résistance interne du générateur.

4. Bilan énergétique d'un générateur

La tension aux bornes du générateur est $U_{PN} = e - rI$

$$E_{ext} = UIt = It(e - rI) = eIt - rI^2 t \Rightarrow E_{ext} = E_g - E_{\text{th}} \Rightarrow \boxed{E_g = E_{ext} + E_{\text{th}}}$$

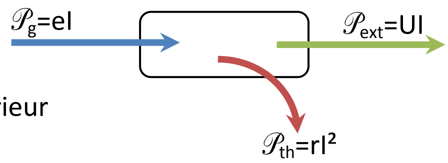
$E_{ext} = UIt$: énergie fournie par le générateur au milieu extérieur.

$E_g = eI$: énergie engendrée par le générateur

$E_{\text{th}} = rI^2 t$: énergie thermique par effet joule.

La puissance extérieure est $\mathscr{P}_{ext} = U_{PN}I = eI - rI^2 = \mathscr{P}_g - \mathscr{P}_{\text{th}} \Rightarrow \boxed{\mathscr{P}_g = \mathscr{P}_{ext} + \mathscr{P}_{\text{th}}}$

$\mathscr{P}_g = eI$: puissance engendrée par le générateur



$\mathscr{P}_{ext} = UI$: puissance fournie par le générateur au milieu extérieur

$\mathscr{P}_{\text{th}} = rI^2$: puissance thermique perdue par effet joule.

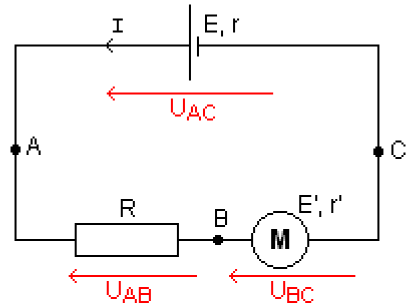
5. Rendement d'un générateur

On définit le rendement d'un générateur quotient entre la puissance utile $\mathscr{P}_{ext}$ et la puissance totale qu'il fournit.

$$\rho = \frac{\mathscr{P}_{ext}}{\mathscr{P}_g} = \frac{U_{PN}I}{eI} = \frac{e - rI}{e} = 1 - \frac{rI}{e} < 1$$

IV. BILAN ENERGETIQUE DANS UN CIRCUIT: LOI DE POUILLET

1. *Circuit série simple*



Il ne peut y avoir ni un générateur spontanée ni mise en réserve d'énergie. C'est le principe de la conservation d'énergie.

$$\mathcal{P}_g = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{\text{th}}$$

$$eI = e'I + (r + r' + R)I^2$$

$$I \neq 0 \Rightarrow e - e' = (r + r' + R)I \Rightarrow \boxed{I = \frac{e - e'}{r + r' + R}}$$

2. *Généralisation*

Considérons un circuit série comportant n générateurs (e_1,r_1); (e_2, r_2) …(e_n, r_n); n' conducteurs ohmiques R_1, R_2 … $R_{n'}$ et n'' récepteurs (e'_1,r'_1); (e'_2, r'_2) …$(e'_{n''}, r'_{n''})$.

Faisons le bilan énergétique du circuit: $\mathcal{P}_g = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{\text{th}}$

$$\sum_{i=1}^{n} e_i = \sum_{i=1}^{n''} e'_i I + \left(\sum_{i=1}^{n} r_i I^2 + \sum_{i=1}^{n'} R_i I^2 + \sum_{i=1}^{n''} r'_i I^2 \right)$$

$$= \sum_{i=1}^{n''} e'_i I + \left(\sum_{i=1}^{n} r_i + \sum_{i=1}^{n'} R_i + \sum_{i=1}^{n''} r'_i \right) I^2$$

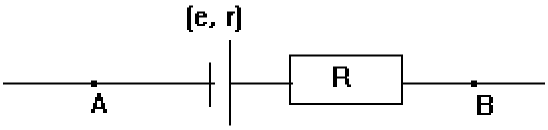
$$I \sum e = I \sum e' + I^2 \sum R$$

$$\boxed{I = \frac{\sum e - \sum e'}{\sum R} \quad \text{loi de Pouillet}}$$

Remarque: un générateur placé en opposition par rapport à un autre générateur de f.é.m. plus grande fonctionne en récepteur de f.c.é.m. égale à sa f.é.m. et de résistance interne identique.

Application:

On considère le dipôle suivant dans lequel $e = 100\ V,\ r = 2\Omega, R = 20\Omega$.



Calculer U_{AB}=U lorsque $I_{AB} = 8A$, puis $I_{BA} = 10A$

Résolution:

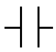
- Pour $I_{AB} = 8$ A: le générateur est en opposition, c'est un récepteur.
  $U_{AB} = rI - (-e) + RI = (r + R)I + e = 22 \times 8 + 100 = 276V$
- Pour $I_{BA} = 10\ A$: on a un générateur (le courant sort par son pôle positif).
  $U_{BA} = RI + rI - e = (R + r)I - e = 22 \times 10 - 100 = 120V$
  $U_{AB} = -U_{BA} = -120V$

Condensateurs

I. Le condensateur

1. Definition et symbole

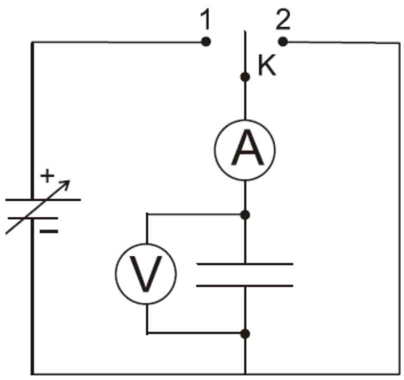
Un condensateur est constitué de deux conducteurs métalliques (les armatures) en influence mutuelle, séparés par un isolant (le diélectrique). Le symbole est:



On notera qu'un circuit série comportant un condensateur est un circuit ouvert. Il ne laisse donc pas passer un courant permanent. Un condensateur ne peut s'utiliser qu'en courant variable ou en régime transitoire.

2. Charge et decharge d'un condensateur

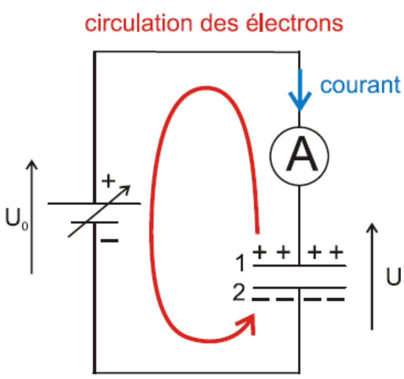
a) Dispositif expérimental



L'interrupteur K peut être fermé soit en position 1 soit en position 2.
A est un ampèremètre très sensible, présentant une caractéristique intéressante: lorsqu'il est parcouru par une impulsion de courant (courant de brève durée), **la déviation maximale de l'aiguille est proportionnelle à la charge totale Q qui l'a traversé**.

b) Charge du condensateur

Fermons K en 1 : l'aiguille de G dévie brièvement.
Le pôle + du générateur attire quelques électrons de l'armature 1, les propulse vers le pôle – d'où ils sont repoussés vers l'armature 2.



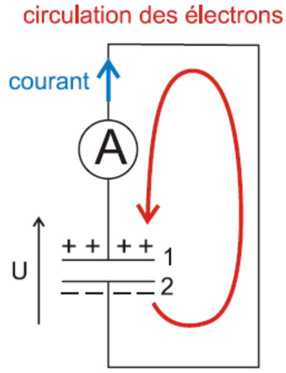
Cette circulation d'électrons donne lieu à une impulsion de courant indiquée par l'ampèremètre. Cette impulsion de courant amène une charge $Q_1 > 0$ sur l'armature 1 et $Q_2 < 0$ sur l'armature 2 du condensateur. On a évidemment: $Q_1 = -Q_2$.
La présence des charges est indiquée par l'existence d'une tension U aux bornes du condensateur.
L'impulsion de courant s'arrête dès que $U=U_0$: aucun courant ne circule plus dans le circuit. On dit alors que l'on a chargé le condensateur, sa charge vaut $Q = |Q_1| = |Q_2|$

Remarque : La charge Q du condensateur est la valeur absolue de la charge qui s'accumule sur l'une

de ses armatures. (La charge totale des 2 armatures est évidemment nulle !)
Ouvrons K : l'aiguille de G ne dévie pas. Aucun courant ne circule. Le condensateur reste chargé. Sa tension est toujours $U=U_0$ et sa charge Q.

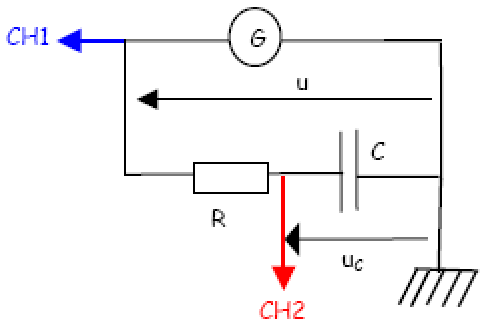
c) Décharge du condensateur

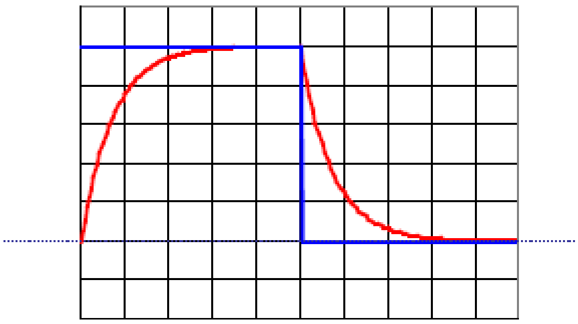
Fermons K en 2 : l'aiguille de G dévie brièvement dans l'autre sens.
Le condensateur chargé est court-circuité. Les électrons de l'armature 2 circulent à travers le circuit pour compenser le défaut d'électrons sur l'armature 1.
La circulation d'électrons s'arrête si les deux 2 armatures sont neutres, c.-à-d. si U = 0 et Q = 0.
Lorsqu'on relie les armatures d'un condensateur chargé par un conducteur, on décharge le condensateur. La tension à ses bornes ainsi que sa charge s'annulent.

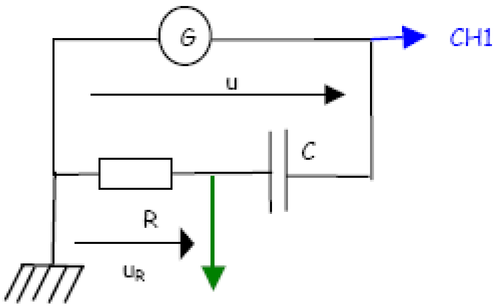


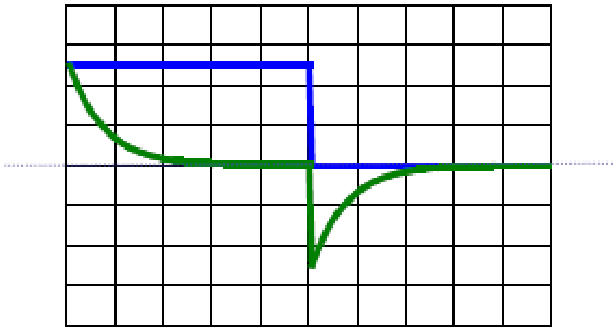
3. Visualisation a l'oscilloscope

Le générateur délivre une tension à échelon de valeur E et 0





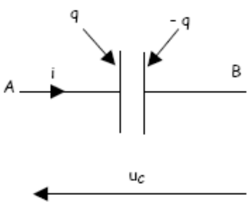




4. Relation entre la charge et l'intensite du courant

Conventions de signe- Relation entre i et q

On oriente le dipôle de A vers B: On place u_C sur le schéma. Soit q la charge de l'armature A (à l'instant considéré) par laquelle entre le sens positif.



On a toujours : $i_{AB} = \frac{dq_A}{dt} = \frac{dq}{dt}$ ou $i_{BA} = \frac{dq_B}{dt} = -\frac{dq}{dt}$

Remarque : Si i est constant i = I et on a alors $I = \frac{q}{t}$. q étant la charge à l'instant t.

5. Capacite d'un condensateur

L'expérience montre qu'un condensateur soumis à une tension u_C prend une charge q proportionnelle à u_C telle que:

$\boxed{q = C\,u_C}$ avec
- q: charge prise par le condensateur en coulomb (C)
- u_C: tension électrique régnant aux bornes du condensateur en volt (V)
- C: capacité du condensateur en farad (F)

Remarque: le farad est une unité représentant une très grande capacité, rarement rencontrée en électronique ou au laboratoire. On utilise couramment les sous multiples: 1mF=10^{-3}F, 1µF=10^{-6}F, 1nF=10^{-9}F (nanofarad) et 1pF=10^{-12}F (picofarad).

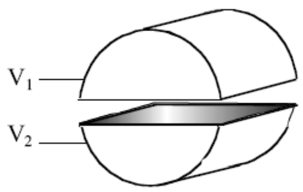
Pour un condensateur plan $C = \frac{\varepsilon . S}{d}$ où ε est une constante dépendant du diélectrique.

Si le diélectrique est le vide: $C = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ · ε_0 est **la permittivité du vide** = $8{,}54 \cdot 10^{-12}$ u.S.I.

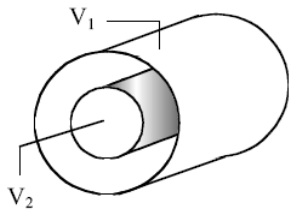
Pour un autre diélectrique : $C = \varepsilon \frac{S}{d}$ ε est **la permittivité du diélectrique** > ε_0

Très souvent, on exprime la permittivité d'un diélectrique à l'aide de celle du vide. On définit **la permittivité relative du diélectrique** ε_r à l'aide de : $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$

Finalement : $\boxed{C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} = \varepsilon_r C_{vide}}$



Armatures rapprochées



Influence totale

II. Énergie emmagasinée dans un condensateur.

1. Relation donnant cette energie.

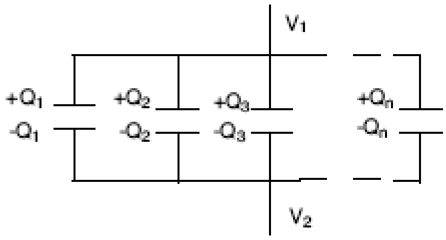
L'énergie emmagasinée dans un condensateur de capacité C aux bornes duquel règne une tension u_C est:

$\boxed{E_C = \frac{1}{2} C u_C^2}$
- E: énergie électrique en joule (J)
- C: capacité du condensateur en farad (F)
- u_C: tension entre les armature du condensateur en volt (V)

$$\boxed{E = \frac{QU}{2} = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}}$$

2. ASSOCIATION DE CONDENSATEURS

- Condensateurs en parallèle:



Soient n conducteurs de capacité C_i mis en parallèle avec la même tension $U=V_1 - V_2$. La charge électrique de chacun d'entre eux est donnée par $Q_i=C_iU$. La charge électrique totale est simplement:

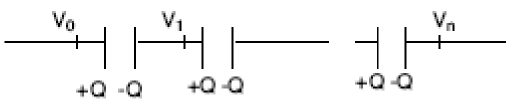
$$Q = \sum_{i=1}^{n} Q_i = \left(\sum_{i=1}^{n} C_i\right)U$$

Ce qui correspond à une capacité équivalente $C_{éq}$ qui est la somme des capacités individuelles

$$\boxed{C_{éq} = \sum_{i}^{n} C_i}$$

- Condensateurs en série:

Soient n condensateurs de capacités C_i mis en série les uns derrière les autres. On porte aux potentiels V_0 et V_n les extrémités de la chaîne et on porte la charge Q sur le premier condensateur. En supposant que tous les condensateurs sont initialement neutres, il s'établit la charge $\pm$Q (par influence) sur les armatures adjacentes. La tension totale aux bornes de la chaîne de condensateurs s'écrit alors simplement:



$$U = V_0 - V_n = (V_0 - V_1) + (V_1 - V_2) + ... + (V_{n-1} - V_n) = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + ... + \frac{Q}{C_n} = \left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{C_i}\right)Q$$

Ce qui correspond à une capacité unique C de capacité équivalente:

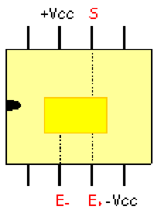
$$\boxed{\frac{1}{C_{éq}} = \sum_{i}^{n}\frac{1}{C_i}}$$

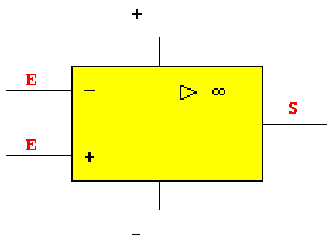
Amplificateur opérationnel

I. Généralités

1. Presentation :

L'amplificateur opérationnel est un circuit intégré. Il est composé de différents éléments parmi lesquels des transistors, des diodes ou des résistances. Il possède deux entrées, une sortie et deux bornes nécessaires à son alimentation.



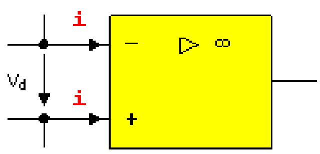


Le composant

Son symbole

- +Vcc et –Vcc correspondent aux deux tensions d'alimentation de l'amplificateur opérationnel, elles ne sont généralement pas représentées. Dans tout le cours qui suit, +Vcc sera égale à +15V, et -Vcc sera égale à - 15 V.
- E+ est l'entrée non inverseuse, une tension appliquée à cette borne donne une tension de sortie de même signe, ou en phase si la tension est alternative.
- E - est l'entrée inverseuse, une tension appliquée à cette borne donne une tension de sortie de signe contraire, ou en opposition de phase si la tension est alternative.
- S est la sortie, elle donne une tension proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux entrées.

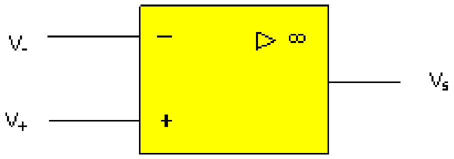
2. Proprietes :



- L'amplification différentielle propre, dite en boucle ouverte, est très élevée, de l'ordre de 10^5. La tension à la sortie donne une tension proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux entrées, cependant, en aucun cas elle ne peut être supérieure aux valeurs absolues des différentes tensions d'alimentation du composant. Elle est donc comprise entre +15 V et – 15 V.
- L'impédance d'entrée est très grande, les intensités des courants d'entrées i^+ et i^-, sont très faibles, de l'ordre du pico ampère.

- L'impédance de sortie est très faible, l'intensité du courant de sortie ne peut dépasser quelques dizaines de milliampères, il est donc conseillé de ne pas utiliser une charge trop faible en sortie de l'amplificateur opérationnel.

Soit ce montage suivant :

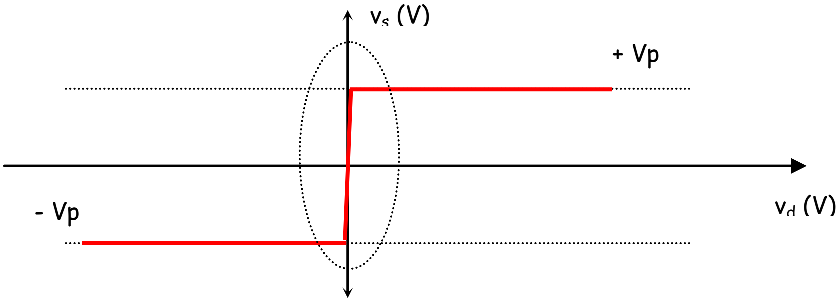


Le potentiel sur la borne inverseuse est égal à v^-.

Le potentiel sur la borne non inverseuse est égal à : v^+.

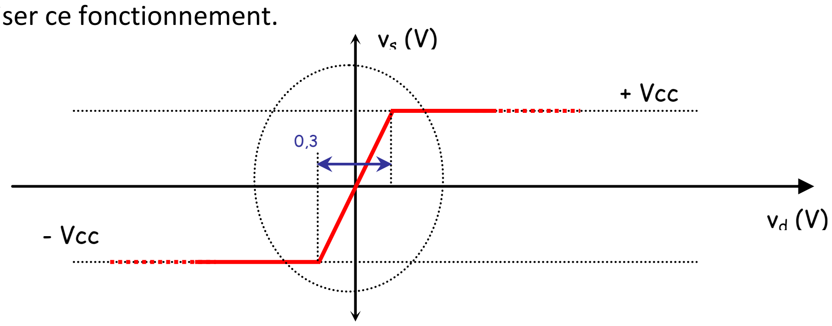
La différence de potentiel, v_d entre v^+ et v^- est de la forme : $v_d = v^+ - v^-$.

La valeur de la tension à la sortie de l'amplificateur opérationnel dépend de la valeur de la différence de potentiel entre v^+ et v^-, soit v_d.



Deux parties sont à étudier :

- Lorsque la tension à la sortie est égale soit à + V_p, soit à – V_p, l'amplificateur travaille en régime non linéaire, ou, régime de saturation. La valeur absolue de la tension V_p est légérement inférieure à la tension V_{cc}.
- Sur un intervalle très restreint, la tension de sortie est proportionnelle à la différence : $v_d = v^+ - v^-$. Cet intervalle correspond à un régime linéaire, un zoom sur cette partie permet de visualiser ce fonctionnement.



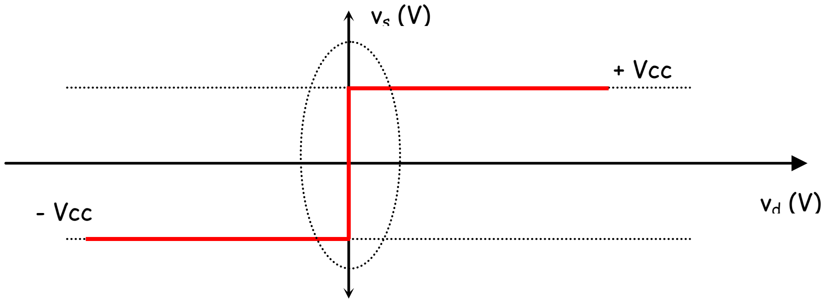
3. Idealisation de l'amplificateur operationnel :

- L'impédance d'entrée est très grande, nous dirons même que celle-ci est infinie pour simplifier l'étude de ce composant. De ce fait, les intensités des courants d'entrées i^+ et i^-, sont considérées comme nulles dans tous les cas et dans tous les montages proposés, ceci quel que soit le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel.

Dans tous les cas, pour un amplificateur idéal :

i^+ et $i^- = 0$ A

La caractéristique de sortie v_s en fonction de la différence des deux tensions d'entrée sera idéalisée comme suit :



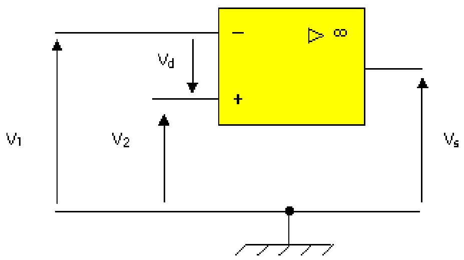
- La tension de sortie de l'amplificateur opérationnel ne peut prendre que deux valeurs avec un fonctionnemnt en régime non linéaire, ces deux valeurs sont les tensions d'alimentation +Vcc ou – Vcc , nous considérons ainsi que l'amplificateur ne subit aucune perte.

Dans tous les cas d'un fonctionnement non linéaire pour un amplificateur idéal :

$$\begin{cases} v_S = +V_{cc} & \text{pour } v_D > 0 \text{ V} \\ v_S = -V_{cc} & \text{pour } v_D < 0 \text{ V} \end{cases}$$

II. Montages électroniques

1. Montage en comparateur :



Pour un fonctionnement en comparateur :					
Si	$v_1 < v_2$	**Alors**	$v_d > 0$ V	**Donc**	$v_s = + Vcc$
Si	$v_1 > v_2$	**Alors**	$v_d < 0$ V	**Donc**	$v_s = - Vcc$

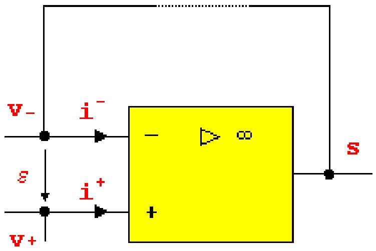
Ce montage est utile pour comparer entre elles deux tensions, ou une tension inconnue à une tension de référence.

2. MONTAGES EN FONCTIONNEMENT LINEAIRE :

Il est possible de réduire l'amplification différentielle afin que le fonctionnement de l'amplificateur opérationnel se situe dans la zone où la tension de sortie est comprise entre les deux tensions d'alimentation, autrement dit que v_d la différence entre les potentiels v^+ et v^-, soit pratiquement nulle.

Pour cela il convient de relier la sortie avec l'entrée inverseuse, cette liaison est parfois nommée contre réaction négative ou boucle de réaction négative, on réinjecte une partie de la tension de sortie sur l'entrée inverseuse.

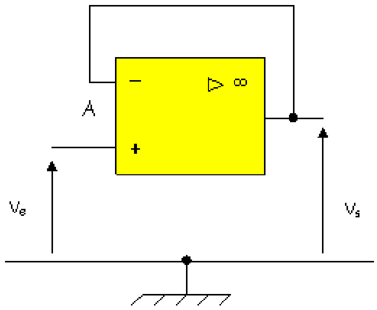
Dans ce type de fonctionnement la tension $v_d = v^+ - v^-$ est appelée ε.



Dans tous les cas d'un fonctionnement linéaire : $\varepsilon = v^+ - v^- = 0$ V

1. Montage suiveur :

Soit le montage suivant :



La tension appliquée sur l'entrée non inverseuse est v_e.

Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est donc linéaire.

Le fonctionnement étant linéaire ε = O V, V_A, le potentiel en A est égal à v_e.

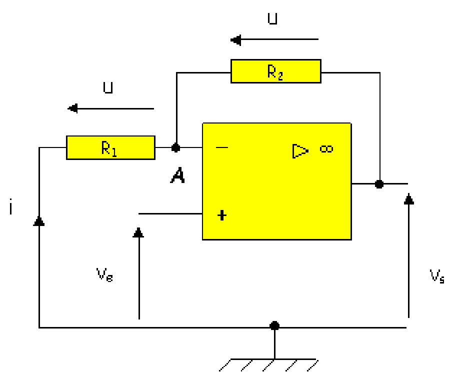
Il n'y a aucun élément entre A et la sortie donc $v_s = v_A = v_e$.

$$\boxed{v_s = v_e}$$

Avec ce montage, le signal d'entrée est intégralement restitué à la sortie, cependant il présente une résistance d'entrée pratiquement infinie, il est utilisé comme adaptateur d'impédance.

2. Montage amplificateur non inverseur :

Soit le montage suivant :



La tension appliquée sur l'entrée non inverseuse est v_e.

- Étude N° 1 :

Appliquons le théorème de Millman au point A :

$$v_A = \frac{\frac{0}{R_1} + \frac{v_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_S$$

- Étude N° 2 :

L'intensité du courant i, dans R_1, est la même dans R_2, car le courant i - est nul.

La tension aux bornes de la résistance R_1 peut s'exprimer comme suit :

$$u_1 = v_{masse} - v_A = R_1.i \qquad \text{donc : } \quad i = -\frac{v_A}{R_1} \quad (1)$$

La tension aux bornes de la résistance R_2 peut s'exprimer comme suit :

$$u_2 = v_A - v_S = R_2.i \qquad \text{donc :} \quad i = \frac{v_A - v_S}{R_2} \quad (2)$$

En égalisant les équations (1) et (2) :

$$v_A = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_S$$

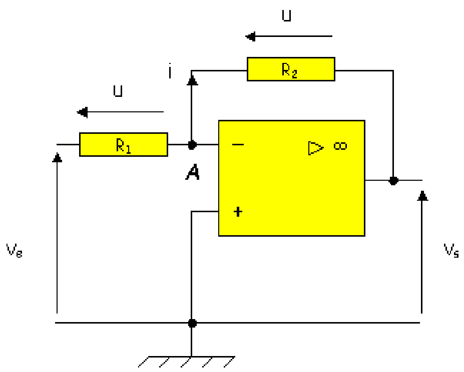
Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, ε = O V, donc v_A, le potentiel en A est égal à v_e.

L'amplification en tension est donc de la forme :

$$\boxed{A_v = \frac{v_S}{v_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}}$$

3. Montage amplificateur inverseur :

Soit le montage suivant :



L'entrée non inverseuse est reliée à la masse donc le potentiel de V+ est égal à 0 V.

- Étude N° 1 :

  Appliquons le théorème de Millman au point A :

$$v_A = \frac{\frac{v_e}{R_1} + \frac{v_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (1)$$

Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, ε = O V donc V_A, le potentiel en A est égal à 0 V.

Le numérateur de l'équation (1) est nul, l'amplification en tension est donc :

$$\boxed{A_v = \frac{v_S}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1}}$$

- Étude N° 2 :

L'intensité du courant i, dans R_1, est la même dans R_2, car le courant i - est nul.

La tension aux bornes de la résistance R_1 peut s'exprimer comme suit :

$u_1 = v_e - v_A = R_1.i$ donc : $i = \frac{v_e - v_A}{R_1}$ (2)

La tension aux bornes de la résistance R_2 peut s'exprimer comme suit :

$u_2 = v_A - v_S = R_2.i$ donc : $i = \frac{v_A - v_S}{R_2}$ (3)

Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, ⍰ = O donc V_A, le potentiel en A est égal à 0 V.

L'équation (2) devient : $i = \frac{v_e}{R_1}$

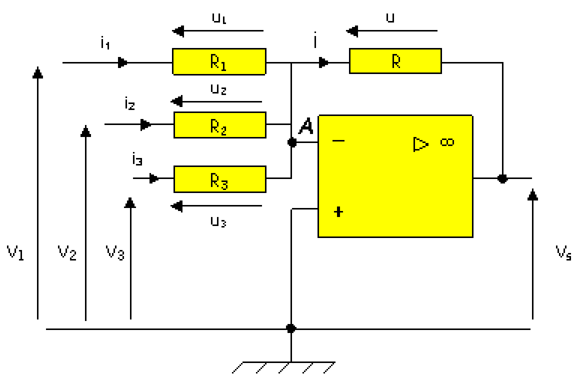
L'équation (3) devient : $i = -\frac{v_S}{R_2}$

En égalisant les deux équations :

$$\boxed{A_v = \frac{v_S}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1}}$$

4. Montage sommateur inverseur :

Soit le montage suivant :



L'entrée non inverseuse est reliée à la masse donc le potentiel de V+ est égal à 0 V.

- Étude N° 1 :

Appliquons le théorème de Millman au point A :

$$v_A = \frac{\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3} + \frac{v_S}{R}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R}} \qquad (1)$$

Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, ⍰ = O V donc V_A, le potentiel en A est égal à 0 V.

Le numérateur de l'équation (1) est nul, ainsi :

$$\boxed{v_s = -R\left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3}\right)}$$

Si toutes les résistances ont la même valeur :

$$\boxed{v_s = -(v_1 + v_2 + v_3)}$$

- Étude N° 2 :

La tension aux bornes de la résistance R_1 peut s'exprimer comme suit :

$$u_1 = v_1 - v_A = R_1.i_1 \qquad \text{donc :} \quad i_1 = \frac{v_1 - v_A}{R_1} \quad (1)$$

La tension aux bornes de la résistance R_2 peut s'exprimer comme suit :

$$u_2 = v_2 - v_A = R_2.i_2 \qquad \text{donc :} \quad i_2 = \frac{v_2 - v_A}{R_2} \quad (2)$$

La tension aux bornes de la résistance R_3 peut s'exprimer comme suit :

$$u_3 = V_3 - V_A = R_3.i_3 \qquad \text{donc :} \quad i_3 = \frac{v_3 - v_A}{R_3} \quad (3)$$

La tension aux bornes de la résistance R peut s'exprimer comme suit :

$$u = v_A - v_S = R.i \qquad \text{donc :} \quad i = \frac{v_A - v_S}{R} \quad (4)$$

Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, ⍰ = O V donc V_A, le potentiel en A est égal à 0.

L'équation (1) devient : $i_1 = \frac{v_1}{R_1}$

L'équation (2) devient : $i_2 = \frac{v_2}{R_2}$

L'équation (3) devient : $i_3 = \frac{v_3}{R_3}$

L'équation (4) devient : $i = -\frac{v_S}{R}$

La loi des nooeuds nous dit que : $i = i_1 + i_2 + i_3$ sachant que $i_- = 0$ A

Donc :

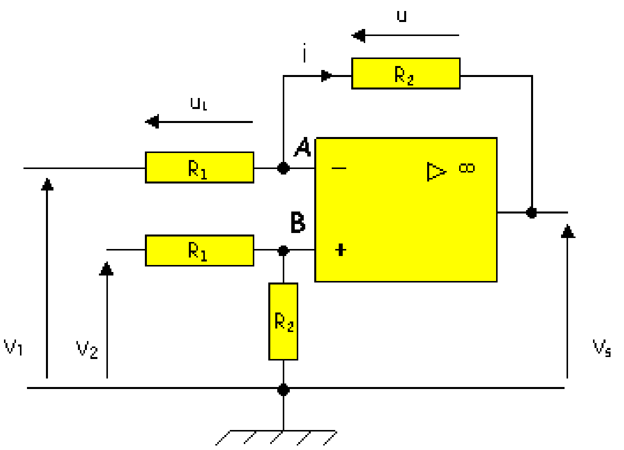
$$\boxed{v_s = -R\left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2} + \frac{v_3}{R_3}\right)}$$

Si toutes les résistances ont la même valeur :

$$\boxed{v_s = -(v_1 + v_2 + v_3)}$$

5. Montage amplificateur de différence :

Soit le montage suivant :



Étude de l'entrée non inverseuse :

L'intensité du courant dans la résistance R_1 est la même que dans la résistance R_2 car l'intensité du courant i+ est nulle. Nous pouvons donc utiliser le pont diviseur de tension, ainsi :

$$v_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_2 \qquad (1)$$

Étude de l'entrée inverseuse :

- Étude N° 1 :

Appliquons le théorème de Millman au point A :

$$v_A = \frac{\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2 v_1 + R_1 v_2}{R_1 + R_2} \qquad (2)$$

- Étude N° 2 :

L'intensité du courant i, dans R_1, est la même dans R_2, car le courant i - est nul.

La tension aux bornes de la résistance R_1 peut s'exprimer comme suit :

$$u_1 = v_1 - v_A = R_1.i \qquad \text{donc : } \quad i = \frac{v_1 - v_A}{R_1} \qquad (3)$$

La tension aux bornes de la résistance R_2 peut s'exprimer comme suit :

$$u_2 = v_A - v_S = R_2.i \qquad \text{donc : } \quad i = \frac{v_A - v_S}{R_2} \qquad (4)$$

En égalisant les équations (3) et (4) Le potentiel au point A peut s'exprimer comme suit :

$$v_A = \frac{R_2 v_1 + R_1 v_2}{R_1 + R_2} \qquad (2)$$

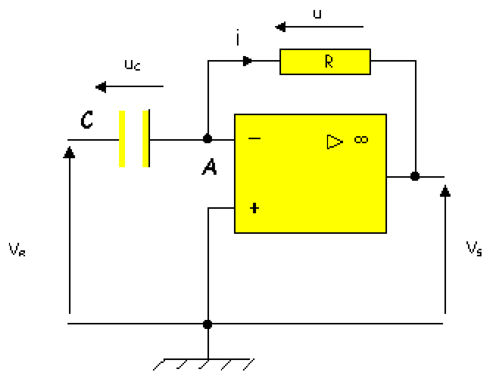
Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, $\varepsilon = 0$ V donc : $v_A = v_B$

Égalisons les équations (1) et (2) :

$$\boxed{v_S = \frac{R_2}{R_1}(v_2 - v_1)}$$

6. Montage dérivateur :

Soit le montage suivant :



L'entrée non inverseuse est reliée à la masse donc le potentiel de V+ est égal à 0V.

Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, ε = O V donc v_A, le potentiel en A est égal à 0 V.

$v_A = 0$ V, la tension u_c est donc égale à : v_e

La tension u_c est également égale à : $\frac{q}{C}$.

La charge q peut se mettre sous la forme : $q = C.v_e$ (2)

$v_A = 0$ v, la tension u est donc égale à : $- v_S$.

Sachant que : $v_s = - R.i$

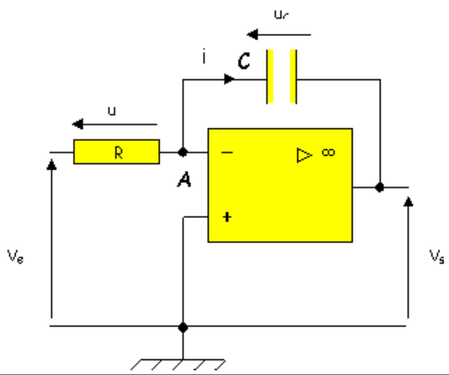
Sachant que : $i = \frac{dq}{dt}$ (3)

Les deux équations (2) et (3) montrent que :

$$\boxed{v_S = - RC.\frac{dv_e}{dt}}$$

7. Montage intégrateur :

Soit le montage suivant :



L'entrée non inverseuse est reliée à la masse donc le potentiel de V+ est égal à 0 V.

Il y a une liaison entre E-, l'entrée inverseuse et S la sortie, le fonctionnement est linéaire, ? = O V donc v_A, le potentiel en A est égal à 0.

$V_A = 0$ V, la tension v_e est donc égale à : R.i (1)

$V_A = 0$ V, la tension u_c est donc égale à : $-v_S$.

La tension u_c est également égale à : $\frac{q}{C}$.

Sachant que : $q = \int i dt$.

v_s peut donc se mettre sous la forme : $v_s = -\frac{1}{C}\int i dt$ (2)

Les deux équations (1) et (2) montrent que :

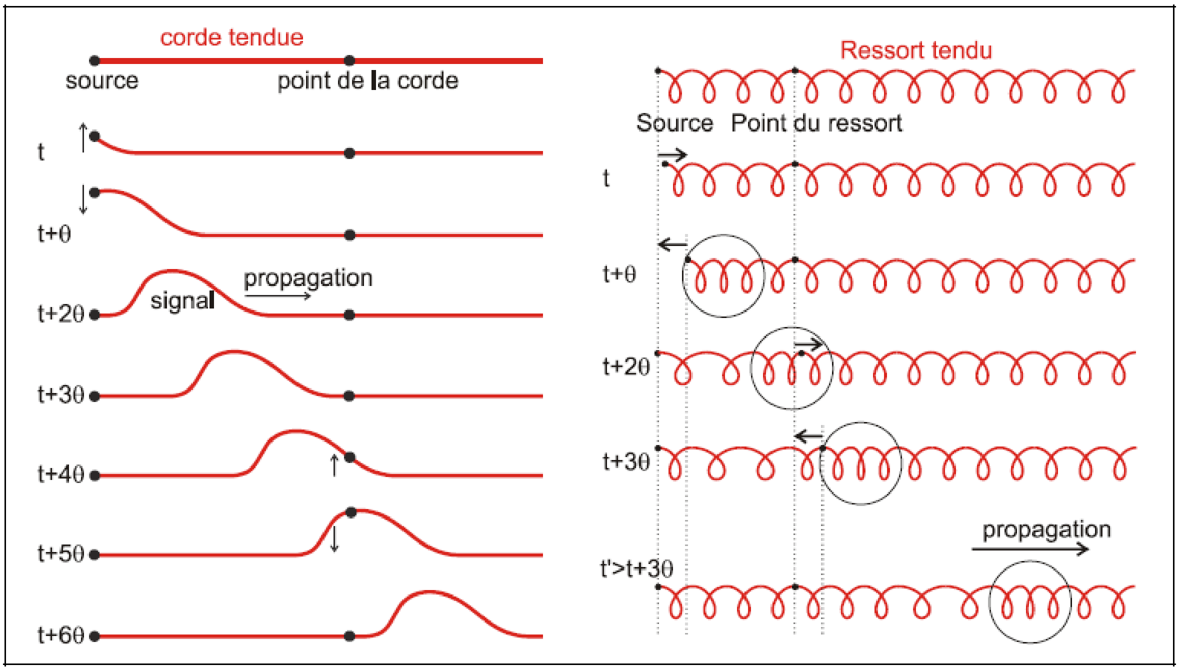
$$\boxed{v_S = -\frac{1}{RC}\int v_e dt}$$

Propagation des signaux, ondes, interférences mécaniques

I. Propagation d'une onde mécanique

1. Signal et onde

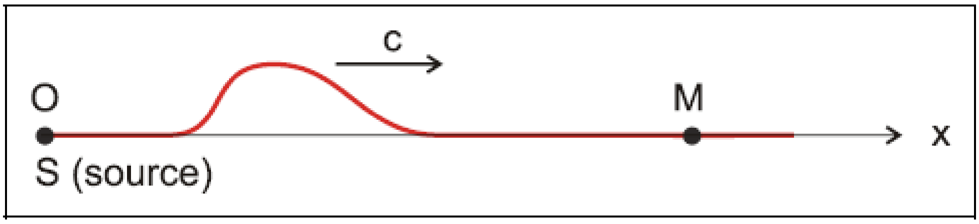
Un **signal mécanique** est une déformation de courte durée d'un **milieu élastique**. Cette déformation ne reste pas localisée à l'endroit où elle est produite, mais elle se déplace dans le milieu élastique: elle se **propage**. Après le passage du signal le milieu reprend son état initial.
Le point de départ du signal est la **source**; la direction et le sens dans lesquels il se déplace constituent la **direction et le sens de propagation**.



Si, lors du passage de la déformation, les différents points du milieu se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation, la déformation est un **signal transversal**.
Si, lors du passage de la déformation, les différents points du milieu se déplacent dans la direction de propagation, la déformation est un **signal longitudinal**.
Une **onde** est une série de signaux qui se suivent à des intervalles de temps réguliers; elle peut être transversale ou longitudinale.

2. Celerite

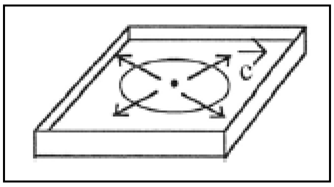
Définition: On appelle **célérité** *c* la vitesse de propagation d'un signal ou d'une onde.



Propriétés:

- La célérité ne dépend pas de la forme du signal.
- Dans un milieu homogène donné la célérité est constante.
- Pour atteindre le point M, l'onde met un temps Δt tel que OM = c·Δt.
  Le point M reproduit le mouvement de la source avec un retard $\Delta t = \frac{OM}{c}$

  Le mouvement de M à la date t est identique au mouvement de S à la date (t − Δt).



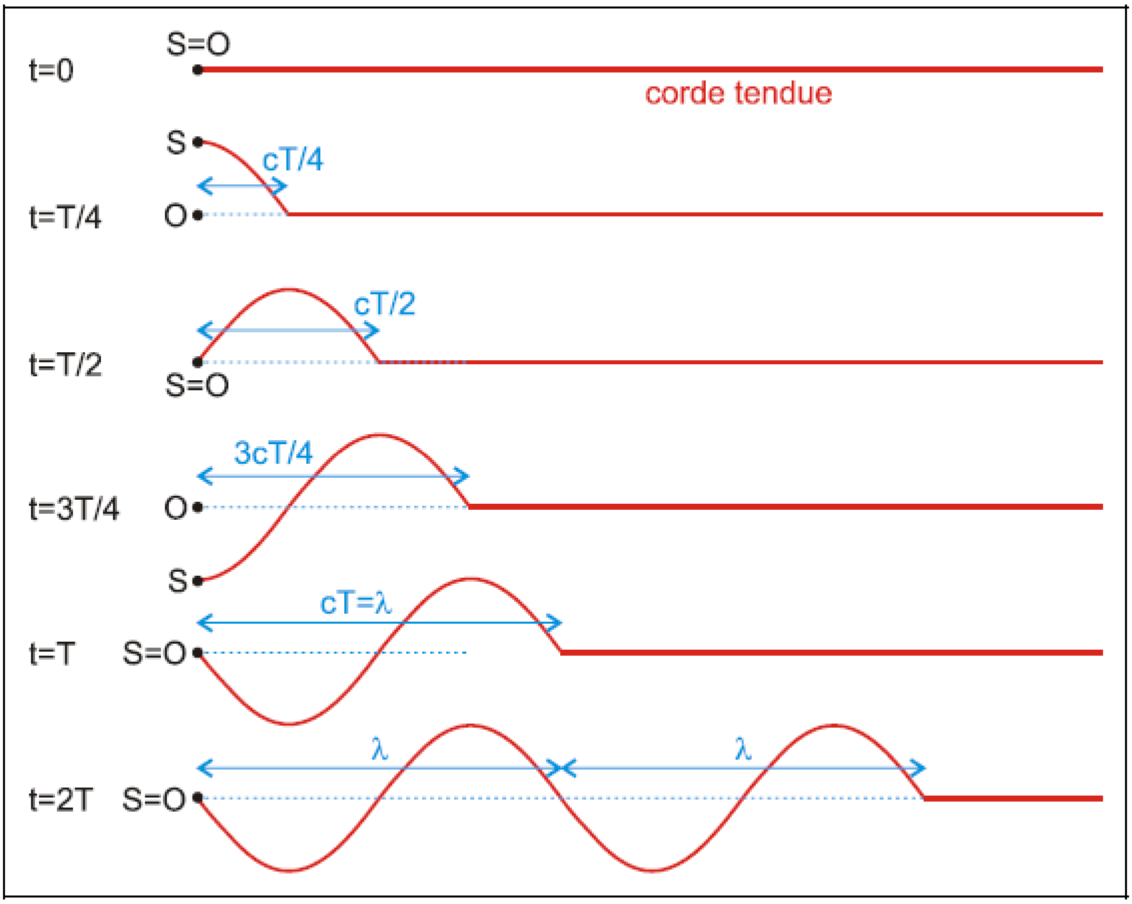
- Dans un milieu homogène à 2 ou 3 dimensions, la célérité est la même dans toutes les directions.
- La célérité dépend de la nature et de l'état du milieu de propagation.
- Le long d'une corde tendue, la célérité augmente avec la tension F_T de la corde et diminue avec la masse linéaire µ (ou masse linéaire = masse par unité de longueur) suivant la relation:

$$\boxed{c = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}}$$

Signal	Milieu de propagation	Célérité en m/s
Son	air à 0°C air à 20°C air à 40°C eau de mer à 15°C acier (ondes transversales) acier (ondes longitudinales) hydrogène à 20°C	330,7 342,6 354,1 1500 3240 5880 1300
Lumière	vide eau verre ordinaire	c 0,75 c 0,66 c

3. Propagation d'une onde sinusoïdale le long d'une corde

Supposons que le mouvement de la source S est sinusoïdal de période T.



Pour comprendre comment la corde se déforme progressivement, il est commode de la représenter à différentes dates:

- t = 0: la source commence son mouvement vers le haut;
- t = $\frac{T}{4}$: la source a fait un quart d'oscillation; le front d'onde atteint le point M_1, tel que

  $OM_1 = c\frac{T}{4}$
- t = $\frac{T}{2}$: la source a fait une demi-oscillation; le front d'onde atteint le point M_2, tel que

  $OM_2 = c\frac{T}{2}$
- t = T: la source a effectué une oscillation complète; la déformation atteint une longueur de corde qu'on appelle **longueur d'onde**: $\boxed{\lambda = c \cdot T}$

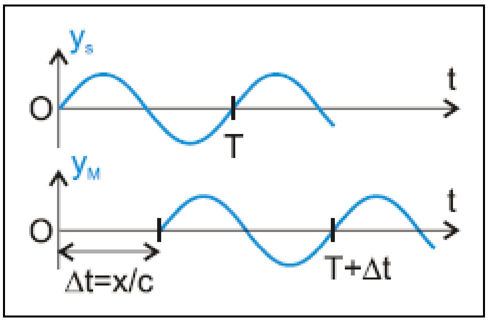
  La longueur d'onde λ est la distance parcourue par l'onde en une période T.

La longueur d'onde dépend à la fois de T, donc de la source, et de c, donc du milieu de propagation.

4. DOUBLE PERIODICITE DU PHENOMENE DE PROPAGATION

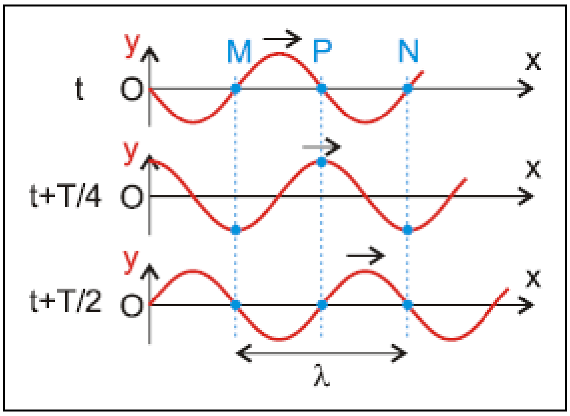
- **Périodicité dans le temps:** Un point M donné du milieu exécute, comme la source, une vibration sinusoïdale qui se reproduit identiquement à elle-même après le temps T: T est la **période temporelle**.

On peut représenter, pour tout point d'abscisse x, l'élongation y en fonction du temps (y_S pour la source S, y_M pour tout autre point M): on obtient **les sinusoïdes du temps.**



La sinusoïde du temps du point M d'abscisse x se déduit de la sinusoïde du temps de la source par une translation $\Delta t = \frac{x}{c}$ le long de l'axe du temps.

- **Périodicité dans l'espace:** A un instant t donné, on retrouve le même état vibratoire le long de la corde après une distance égale à la longueur d'onde λ: λ **est la période spatiale.**
  On peut représenter, pour tout instant t, l'élongation y des points du milieu en fonction de leur abscisse: on obtient **les sinusoïdes de l'espace.**



(La sinusoïde de l'espace se confond avec l'image qu'on obtiendrait en photographiant la corde à un instant donné.)
La sinusoïde de l'espace progresse au cours du temps, avec une vitesse égale à la célérité: la vibration de la source engendre dans le milieu une **onde progressive**.

5. Points vibrant en phase et points vibrants en opposition de phase

Deux points M et N de la corde, séparés des distances λ, 2λ, ... ,nλ (n ∈ $\mathbb{Z}$) ont à tout instant même élongation: ils vibrent **en phase**.

$$\boxed{\Delta x = x_N - x_M = n\lambda = 2n\frac{\lambda}{2}}$$

La longueur d'onde λ représente donc aussi la distance entre 2 points voisins qui vibrent en phase, en particulier la distance entre 2 crêtes voisines.

Deux points M et P de la corde, séparés des distances $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \ldots, (2n+1)\frac{\lambda}{2}$ ont à tout instant des élongations opposées: ils vibrent en **opposition de phase**.

$$\boxed{\Delta x = x_P - x_N = (2n+1)\frac{\lambda}{2}}$$

6. ÉQUATION D'ONDE

Considérons une source S en train d'effectuer un mouvement harmonique (amplitude Y_m, pulsation ω).

L'élongation de la source S s'écrit: $\boxed{y_S(t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi)}$

Nous supposons que la propagation se fait **sans amortissement** dans le sens des x positifs.

Pour atteindre le point M situé à la distance x de la source, l'onde met le temps

$$\boxed{\Delta t = \frac{x}{c}}$$

M reproduit donc le mouvement de S avec un retard de Δt!

L'élongation du point M à la date t, est donc égale à celle que la source avait à la date t − Δt!

$$\begin{aligned} y_M(t) &= y_S(t-\Delta t) \\ &= Y_m \sin\left[\omega(t-\Delta t)+\varphi\right] \\ &= Y_m \sin\left[\omega\left(t-\frac{x}{c}\right)+\varphi\right] \\ &= Y_m \sin\left[\frac{2\pi}{T}\left(t-\frac{x}{c}\right)+\varphi\right] \\ &= Y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{T\cdot c}\right)+\varphi\right] \end{aligned}$$

$$\boxed{y_M(t) = Y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\varphi\right]} \quad \textbf{(équation d'onde)}$$

Tous les points ont **même amplitude et même pulsation** que la source, mais ils n'effectuent pas le même mouvement en même temps.

7. INTERPRETATION DE L'EQUATION D'ONDE: DOUBLE PERIODICITE

y_M reprend la même valeur chaque fois que la phase $2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\varphi$ change de 2kπ (k entier).

De quelle durée t' faut-il augmenter t pour qu'en un point M donné (x fixe), la phase augmente de 2π?

$$\begin{aligned} 2\pi\left(\frac{t+t'}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\varphi &= 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\varphi+2\pi \\ 2\pi\frac{t+t'}{T}-2\pi\frac{x}{\lambda} &= 2\pi\frac{t}{T}-2\pi\frac{x}{\lambda}+2\pi \\ 2\pi\frac{t}{T}+2\pi\frac{t'}{T} &= 2\pi\frac{t}{T}+2\pi \\ 2\pi\frac{t'}{T} &= 2\pi \\ t' &= T \end{aligned}$$

T est la période temporelle.

De quelle distance x' faut il augmenter x pour qu'à un instant donné la phase diminue de 2π?

$$2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x+x'}{\lambda}\right)+\varphi=2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right)+\varphi-2\pi$$

$$2\pi\frac{x+x'}{\lambda}=2\pi\frac{x}{\lambda}+2\pi$$

$$2\pi\frac{x'}{\lambda}=2\pi$$

$$x'=\lambda$$

λ est la période spatiale.

II. Interférence mécanique

1. Definitions. Condition d'interference

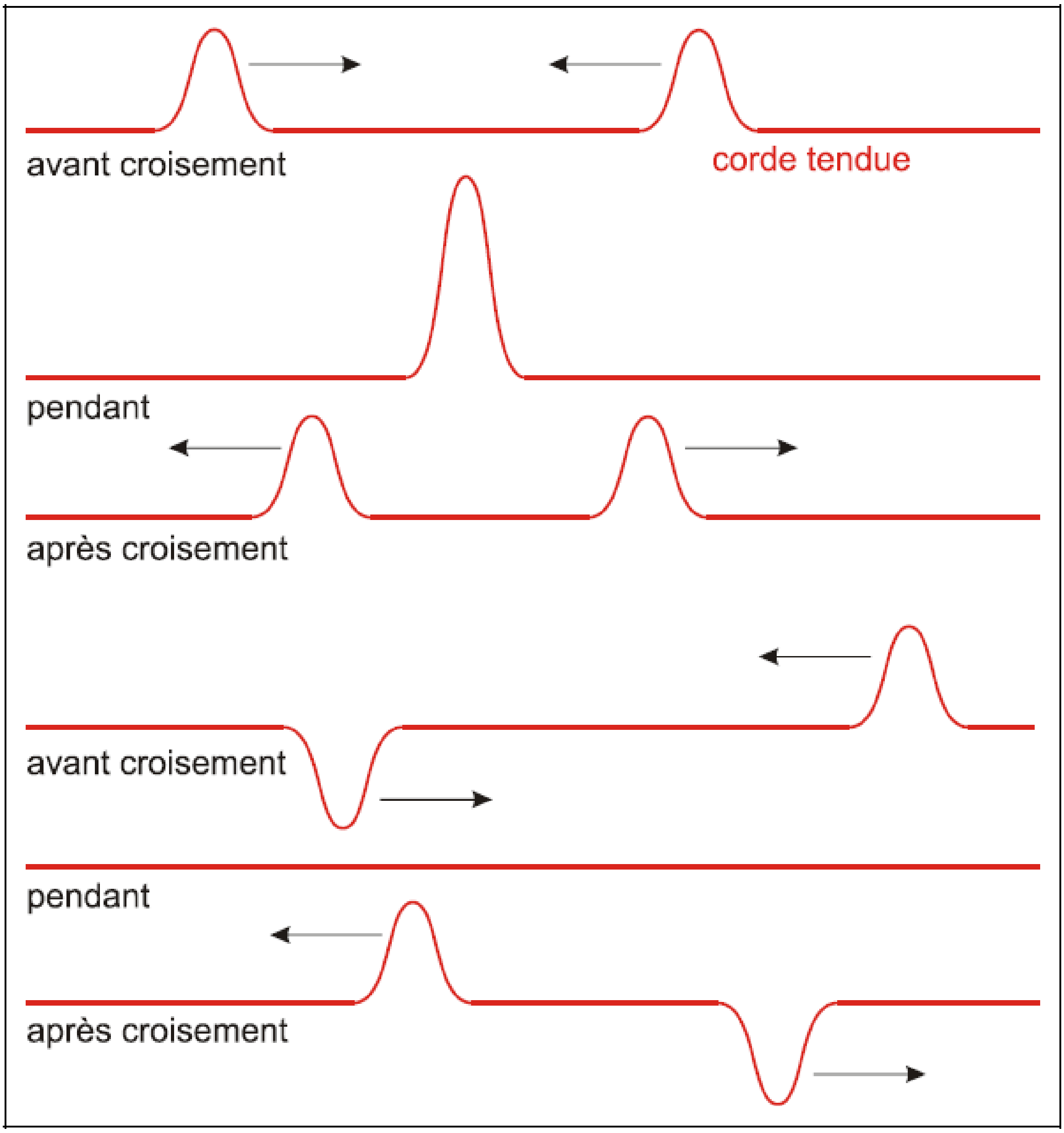
Deux sources d'ondes sont **synchrones** si elles sont en phase.
Deux sources d'ondes sont **cohérentes** si elles présentent une différence de phase constante l'une par rapport à l'autre.
L'interférence est un phénomène qui résulte de la superposition de deux ondes de même nature et de même fréquence. Les sources émettrices de ces ondes doivent être cohérentes.

2. Superposition des petits mouvements

Quand deux signaux se rencontrent, ils se croisent sans se gêner; leur propagation et leur forme ne sont pas modifiées après le croisement.
Pendant le croisement l'élongation résultante est donnée par la règle de superposition des petits mouvements:
Lorsque deux signaux colinéaires de faible amplitude se superposent en un point M, l'élongation résultante y est égale à la somme algébrique des élongations y_1 et y_2 que provoqueraient en M les deux signaux en se propageant seuls.

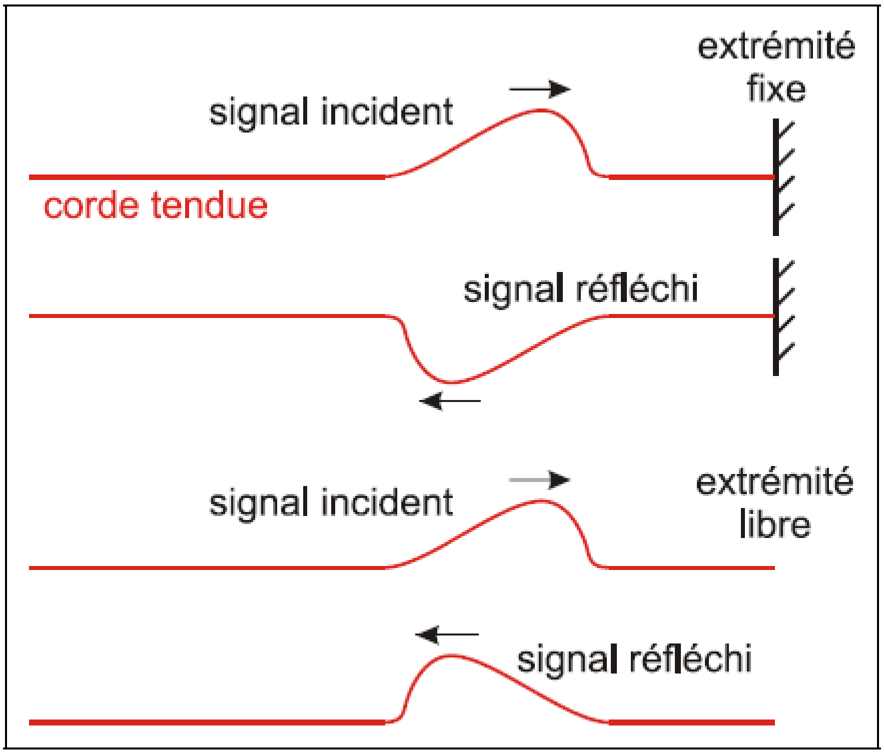
$$\boxed{y=y_1+y_2}$$

Les deux signaux peuvent ainsi se renforcer lors de leur croisement ou bien se détruire.


avant croisement
corde tendue
pendant
après croisement
avant croisement
pendant
après croisement

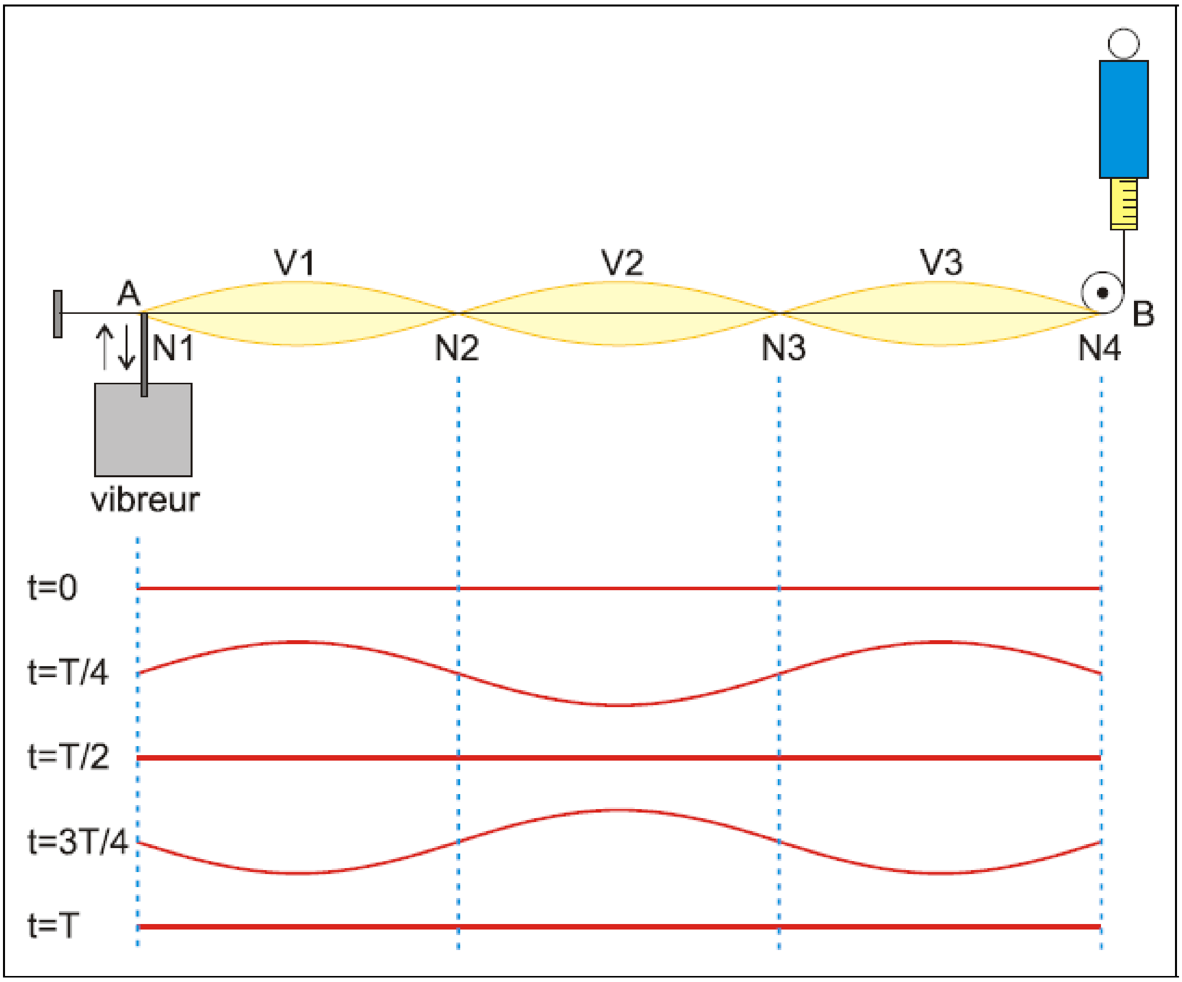
3. Reflexion d'un signal a l'extremite d'une corde

Lors de la réflexion sur une extrémité fixe, l'élongation change de signe; la réflexion à l'extrémité libre se fait sans changement de signe.



4. Interference dans un milieu a une dimension. Experience de Melde

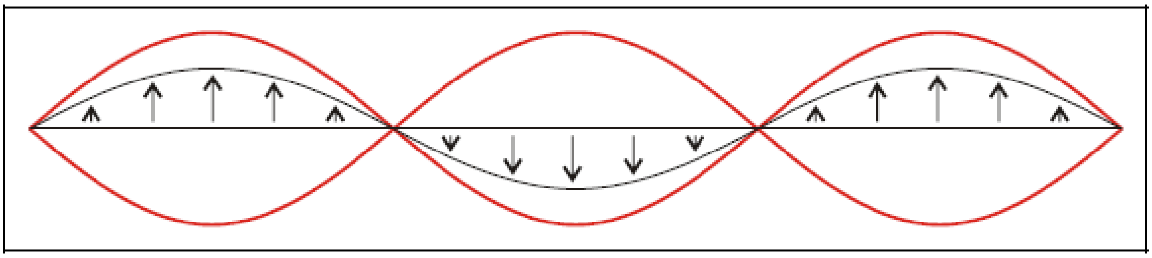
a) *Dispositif expérimental*



Un vibreur anime l'extrémité A d'une corde tendue d'un mouvement vibratoire sinusoïdal. À l'extrémité B, au contact de la poulie, prend naissance une onde réfléchie de même fréquence qui se propage en sens inverse. On peut varier la longueur utile AB = ℓ de la corde, la tension F_T de la corde mesurée par un dynamomètre et la fréquence f du vibreur.

b) Observations

Pour un réglage convenable, la corde vibre en plusieurs **fuseaux** d'égale longueur. Les extrémités des fuseaux sont appelés **nœuds**, les milieux des fuseaux sont appelés **ventres** de vibration. L'extrémité fixée au vibreur peut être assimilée à un nœud; l'extrémité fixe est un nœud.
Vu de loin, le système paraît immobile; il n'y a pas de progression le long de la corde: le phénomène est appelé **onde stationnaire**.
L'éclairage stroboscopique permet de voir que la corde se déforme sur place. L'amplitude de vibration est nulle aux nœuds, elle est maximale aux ventres. La longueur d'un fuseau est égale à $\frac{\lambda}{2}$.



L'aspect de la corde dépend:

- de la tension F_T de la corde;
- de la longueur ℓ de la corde;
- de la fréquence f du vibreur.

L'apparence en fuseaux n'est obtenue que pour des valeurs discrètes de ces paramètres.
Le nombre n de fuseaux

- diminue quand on augmente la tension de la corde (sans modifier sa longueur ni la fréquence);
- augmente quand on augmente la longueur utile de la corde (sans modifier sa tension ni la fréquence);
- augmente lorsqu'on augmente la fréquence du vibreur (sans modifier ni la longueur ni la tension).

c) Interprétation

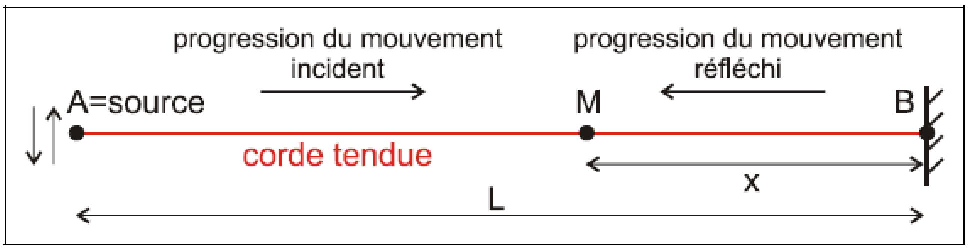
Une onde stationnaire résulte de l'interférence entre deux ondes qui se propagent suivant la même direction, mais en sens contraires: l'onde incidente issue de la source et l'onde réfléchie qui prend naissance à l'extrémité fixe. Ces deux ondes ont même fréquence et même amplitude.

Aux ventres ces deux ondes arrivent constamment en phase: il y a **interférence constructive**. L'amplitude résultante est égale à la somme des amplitudes des ondes composantes.

Aux nœuds ces deux ondes arrivent constamment en opposition de phase: il y a **interférence destructive.** L'amplitude résultante est égale à la différence des amplitudes des ondes composantes, donc elle est nulle.

* Etude théorique

La source A présente un mouvement d'élongation : $y_A = Y_m \sin 2\pi \frac{t}{T}$



En un point quelconque M de la corde se superposent deux mouvements :

celui issu directement de la source A $\qquad y_i = Y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L-x}{\lambda}\right)\right]$

celui réfléchi par l'obstacle fixe B $\qquad y_r = Y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L+x}{\lambda}\right) + \pi\right]$

(Il faut tenir compte du changement de phase à la réflexion, ce qui revient mathématiquement à ajouter π à la phase !)

L'élongation résultante du point M est : $\qquad y = y_i + y_r$

Comme $\sin p + \sin q = 2\sin\frac{p+q}{2}\cdot\cos\frac{p-q}{2}$ (formules trigonométriques), on obtient :

$$y = 2Y_m \cdot \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda}\right) + \frac{\pi}{2}\right]\cdot\cos\left(2\pi\frac{x}{\lambda} - \frac{\pi}{2}\right)$$

Or cos (α-π/2) = sinα $\quad\Rightarrow\quad y = 2Y_m \cdot \sin 2\pi\frac{x}{\lambda}\cdot\sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{L}{\lambda}\right) + \frac{\pi}{2}\right]$

$$y = 2Y_m \cdot \sin 2\pi\frac{x}{\lambda}\cdot\sin\left[2\pi\frac{t}{T} - 2\pi\frac{L}{\lambda} + \frac{\pi}{2}\right]$$

$$= A\cdot\sin\left[2\pi\frac{t}{T} + \Phi\right]$$

Le point M effectue donc un mouvement harmonique

- d'amplitude $\boxed{A = 2Y_m \cdot \sin 2\pi\frac{x}{\lambda}}$ dépendant de la position du point M,
- de période T égale à celle de la source,
- de phase initiale Φ.

Les nœuds se trouvent dans des positions tel que

$$\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} = 0 \quad\Leftrightarrow\quad 2\pi\frac{x}{\lambda} = k\pi \quad\Leftrightarrow\quad \boxed{x = k\frac{\lambda}{2}} \qquad k \in \mathbb{Z}$$

Les ventres se trouvent dans des positions tel que

$$\sin 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm 1 \quad \Leftrightarrow \quad 2\pi\frac{x}{\lambda} = (2k'+1)\frac{\pi}{2} \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{x = (2k'+1)\frac{\lambda}{4}} \qquad k' \in \mathbb{Z}$$

La longueur d'un fuseau (distance entre 2 nœuds consécutifs) est donc égale à $\lambda/2$.
Les ventres se trouvent au milieu entre deux nœuds consécutifs.

d) Application aux instruments à cordes

La corde, tendue entre deux points fixes, vibre en un nombre entier de fuseaux, donc sa longueur est égale à un multiple de la demi-longueur d'onde:

$$\boxed{\ell = n\frac{\lambda}{2} = n\frac{c}{2f} = \frac{n}{2f}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}}$$

avec n = nombre de fuseaux
c = célérité le long de la corde
f = fréquence de la vibration
F_T = tension de la corde
μ = masse linéaire de la corde

Pour F_T, c et μ donnés, on obtient une onde stationnaire seulement pour les fréquences vérifiant la relation:

$$\boxed{f = \frac{n}{2\ell}\sqrt{\frac{F_T}{\mu}}}$$, $n \in \mathbb{N}$ (**fréquences propres** de la corde)

La valeur n = 1 correspond au son le plus grave que la corde puisse émettre: c'est le **son fondamental.** La corde vibre alors en un seul fuseau.
Aux valeurs n = 2, 3 ... correspondent des sons plus aigus, appelés **harmoniques**.

La formule des cordes vibrantes montre que

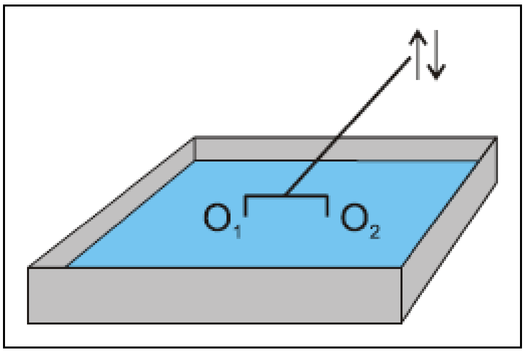
- la fréquence du son fondamental augmente avec la tension de la corde, propriété utilisée pour accorder les instruments;
- plus la masse linéaire est grande, plus la fréquence du son émis est faible, donc plus le son est grave, pour une tension et une longueur données;
- plus la corde est courte, plus la fréquence est élevée, donc plus le son émis est aigu, pour une tension et une masse linéaire données.

e) Remarque intéressante

Tout système élastique limité dans l'espace peut être considéré comme oscillateur mécanique présentant un nombre (presque) infini de fréquences propres.
Le système vibre avec amplitude maximale si la fréquence excitatrice correspond à l'une des fréquences propres. (Il y a résonance!)

5. Interference dans un milieu a deux dimensions

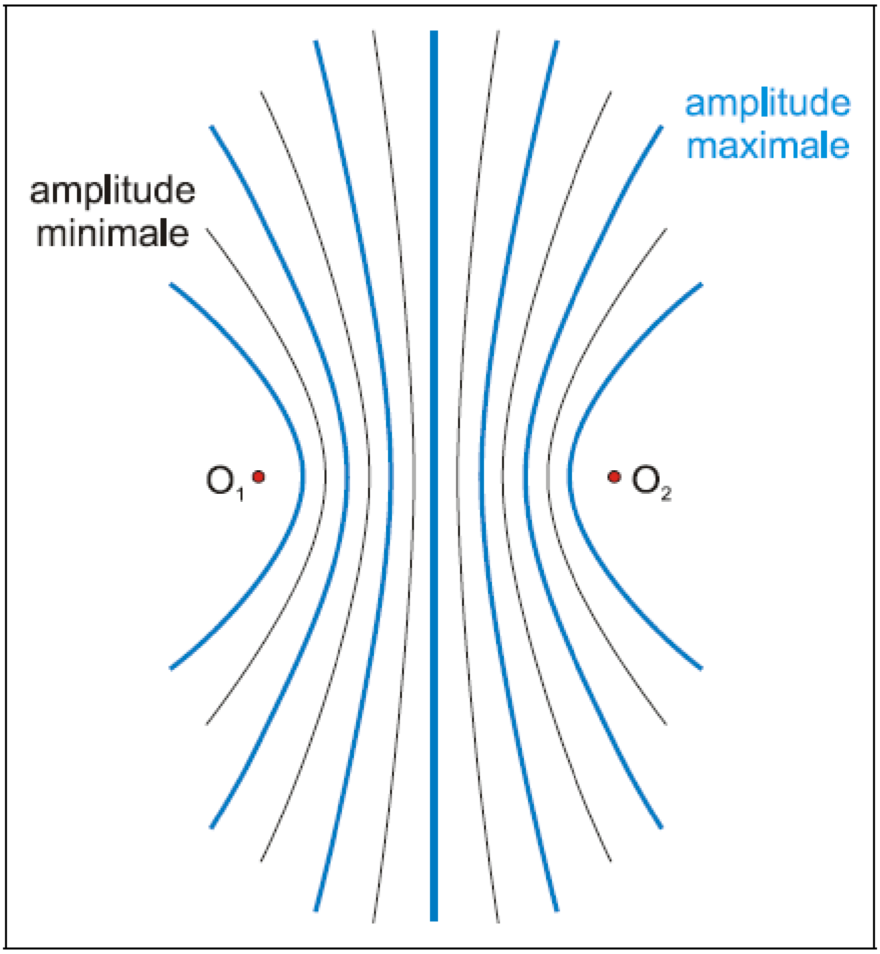
a) Dispositif expérimental



Une fourche munie de deux pointes est fixée à l'extrémité d'un vibreur. Les pointes O_1 et O_2 ont ainsi même fréquence et constituent deux sources cohérentes. Elles font naître à la surface de l'eau des ondes circulaires.

b) Observations

A la surface libre du liquide on observe des rides fixes, bien nettes entre O_1 et O_2. Elles ont la forme d'arcs d'hyperboles dont les foyers sont O_1 et O_2. On les appelle des lignes ou des **franges d'interférence**. Elles disparaissent si l'une des pointes vibre sans toucher l'eau.



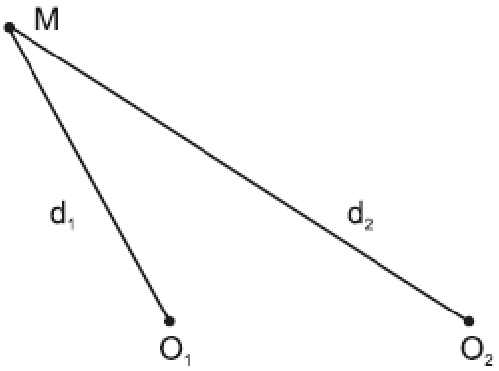
c) Interprétation

Supposons que les deux pointes frappent l'eau exactement au même instant: O_1 et O_2 constituent alors deux sources synchrones. Si elles pénètrent à la même profondeur dans l'eau elles constituent des sources synchrones de même amplitude.

Avec un choix convenable de l'origine des temps (pour que φ = 0) leur équation horaire peut s'écrire:

$$\boxed{y = Y_m \sin\omega t}$$

Soit M un point de la surface de l'eau situé à la distance d_1 de O_1 et à la distance d_2 de O_2.



Si ces distances sont petites on pourra négliger l'amortissement des ondes.

L'onde venant de O_1 impose au point M une élongation $y_1 = Y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda}\right)$

L'onde venant de O2 impose au point M une élongation $y_2 = Y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda}\right)$

L'élongation résultante en M est $y = y_1 + y_2$ (superposition des petits mouvements)

d) Interférence constructive

L'amplitude du mouvement résultant est maximale et égale à $2Y_m$ aux points où les 2 vibrations y_1 et y_2 sont en phase.

$$\sin a = \sin b \Leftrightarrow a = b + n \cdot 2\pi, \quad n \in \mathbb{Z}$$

$$y_1 = y_2 \Leftrightarrow 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda}\right) = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda}\right) + n \cdot 2\pi, \quad n \in \mathbb{Z}$$

$$\boxed{d_2 - d_1 = n \cdot \lambda = 2n \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad n \in \mathbb{Z}}$$

A chaque valeur de n correspond une hyperbole.
Les points qui obéissent à la condition n = 0 sont ceux appartenant à la médiatrice de O_1O_2.
Les points qui obéissent à la condition n ≠ 0 appartiennent à une famille d'hyperboles de foyers O_1 et O_2.

e) Interférence destructive

L'amplitude du mouvement résultant est minimale et nulle aux points où les 2 vibrations y_1 et y_2 sont en opposition de phase.

$$\sin a = -\sin b \Leftrightarrow a = b + (2n'+1)\pi, \quad n' \in \mathbb{Z}$$

$$y_1 = -y_2 \Leftrightarrow 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda}\right) = 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda}\right) + (2n'+1)\pi, \quad n' \in \mathbb{Z}$$

$$\boxed{d_2 - d_1 = (2n'+1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad n' \in \mathbb{Z}}$$

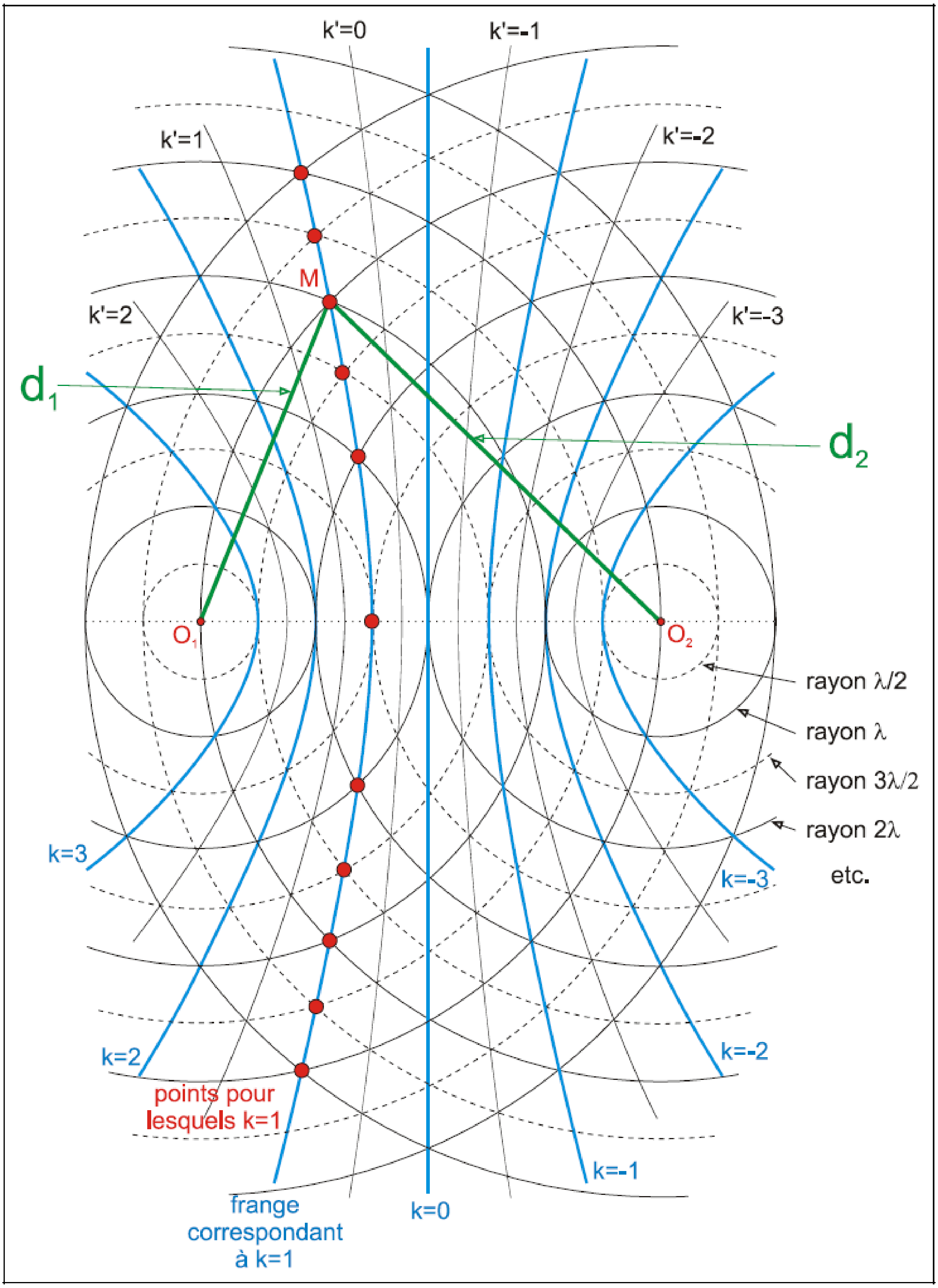
Les points qui obéissent à cette condition appartiennent à une autre famille d'hyperboles de foyers O_1 et O_2 qui s'intercalent entre les précédentes. A chaque valeur de n' correspond une hyperbole.

f) Points intermédiaires

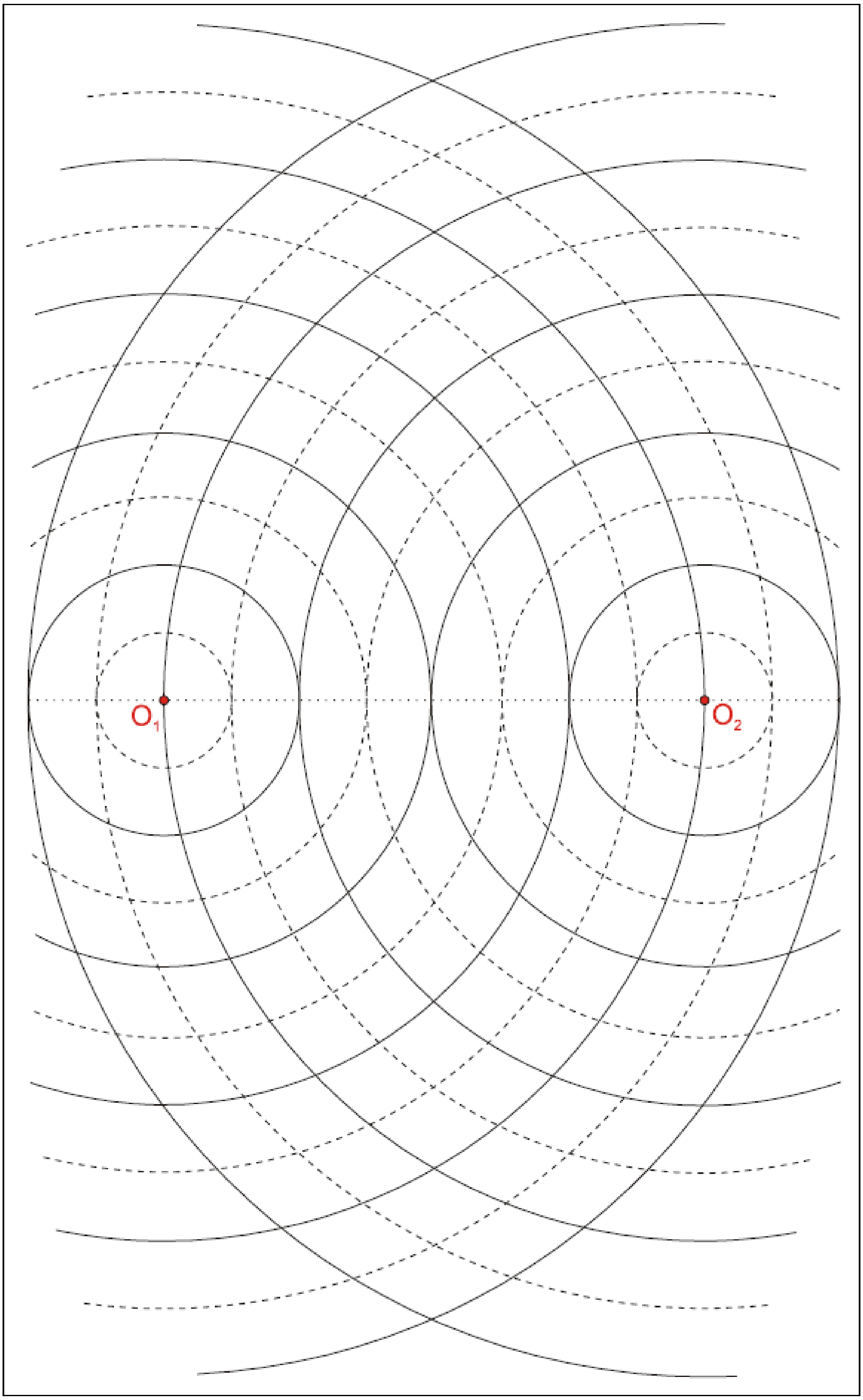
L'état vibratoire en un point M dépend donc de la différence des distances de ce point aux deux sources: $d_2 - d_1 = \delta$ est appelée **différence de marche**.

g) Conclusions

Il y a interférence constructive en M, si la différence de marche est égale à un nombre pair de demi-longueurs d'onde. L'amplitude en M est alors maximale, égale à $2Y_m$.
Il y a interférence destructive en M, si la différence de marche est égale à un nombre impair de demi-longueurs d'onde. L'amplitude en M est alors minimale, égale à 0.
Si aucune de ces conditions n'est remplie, l'amplitude en M est comprise entre 0 et $2Y_m$.


k'=0
k'=-1
k'=1
k'=-2
k'=2
k'=-3
M
d1
d2
O1
O2
rayon λ/2
rayon λ
rayon 3λ/2
rayon 2λ
etc.
k=3
k=-3
k=2
k=-2
k=-1
k=0
points pour lesquels k=1
frange correspondant à k=1

Exercez-vous à représenter toutes les franges d'interférence !



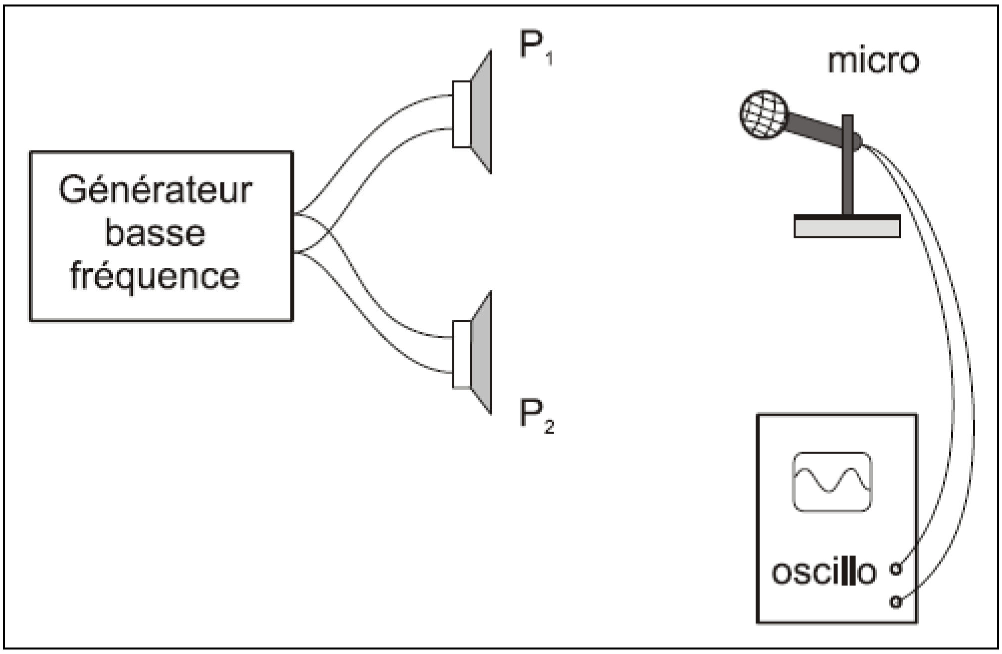
6. INTERFERENCE DANS UN MILIEU A TROIS DIMENSIONS

a) Détection des ondes acoustiques

Les ondes sonores ou acoustiques sont des ondes longitudinales qui se propagent dans tout milieu élastique, en particulier dans l'air. L'onde se propage dans toutes les directions de l'espace à partir de la source.
L'oreille mise à part, le détecteur de choix est le microphone. Sa pièce maîtresse est une membrane élastique que l'onde sonore met en vibration. Les vibrations mécaniques de la membrane sont ensuite transformées en vibrations électriques, c.-à-d. en tension alternative qu'on peut visualiser sur l'écran d'un oscilloscope.

b) Expérience

Deux haut-parleurs P_1 et P_2, alimentés par un même générateur, basse fréquence (f = 1500 Hz), sont placés l'un à côté de l'autre. Un microphone mobile est relié à un oscilloscope.



c) Observations

Quand on déplace le microphone parallèlement à l'alignement des deux haut-parleurs, l'amplitude de la vibration sonore qu'il détecte passe alternativement par un minimum et par un maximum. Ces variations de l'amplitude du son détecté peuvent être observées non seulement dans le plan des deux haut-parleurs, mais dans tout l'espace compris entre eux.

d) Interprétation

L'onde sonore détectée résulte de l'interférence entre les deux ondes acoustiques cohérentes émises par les deux haut-parleurs.
Il y a interférence constructive (amplitude maximale) en tout point M pour lequel la différence de marche des deux ondes acoustiques est telle que

$$\boxed{P_1M - P_2M = 2n\frac{\lambda}{2}},\ n \in \mathbb{Z}$$

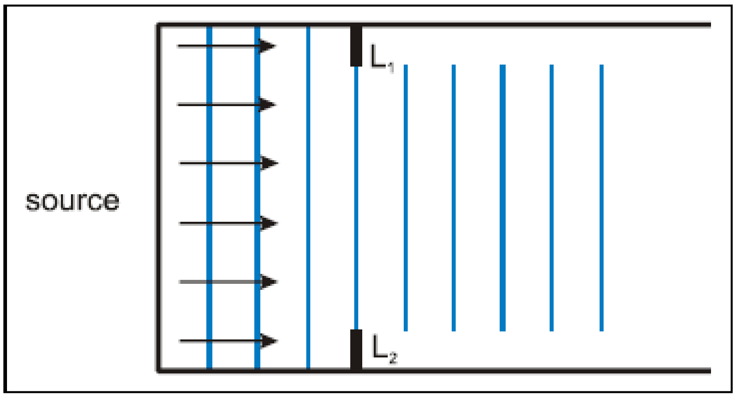
Il y a interférence destructive (amplitude minimale) en tout point N pour lequel la différence de marche des deux ondes acoustiques est telle que

$$\boxed{P_1M - P_2M = (2n'+1)\frac{\lambda}{2}}\ ,\ n'\in\mathbb{Z}$$

7. Diffraction des ondes mecaniques

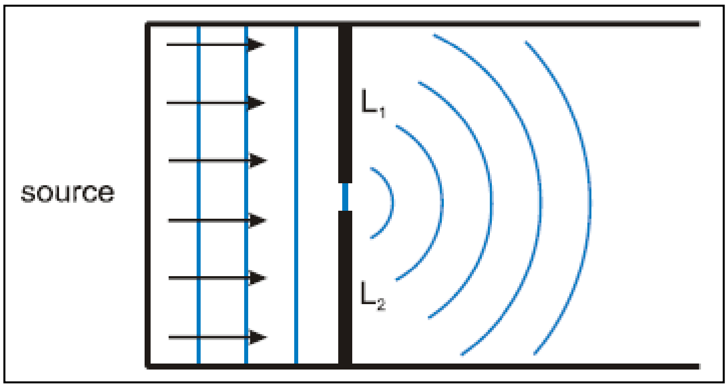
Deux lames L_1 et L_2 placées dans une cuve à ondes constituent un obstacle pour les ondes qui s'y propagent: la largeur de l'ouverture entre les deux lames est réglable.

- **1er cas:** la largeur de l'ouverture est grande comparée à la longueur d'onde de l'onde incidente.



Les ondes se propagent dans la seconde partie de la cuve sans perturbation importante.
Les ondes rectilignes restent rectilignes, mais l'ouverture limite leur propagation sur une largeur qui est égale à sa propre largeur. On dit que l'ouverture a **diaphragmé** l'onde incidente.

- **2e cas:** la largeur de l'ouverture est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde incidente. (La mince ouverture est encore appelée **fente**.)



Au contact de la fente, l'onde rectiligne donne naissance à une onde circulaire centrée sur la fente. Celle.ci se comporte comme une source secondaire qui émet des vibrations vers la seconde partie de la cuve sur toute sa largeur: **l'onde est diffractée par la fente.**

- **Propriétés de l'onde diffractée**

L'onde diffractée a même fréquence que l'onde incidente.
Les deux milieux de propagation étant identiques, les deux ondes ont même célérité.
Les deux ondes ont donc aussi même longueur d'onde.

Exercices

Exercice 1:

Une lame vibrante, de fréquence f = 100 Hz, est munie d'une pointe qui produit en un point O de la surface d'une nappe d'eau une perturbation transversale, sinusoïdale, d'amplitude 1 mm, se propageant dans toutes les directions du liquide à la vitesse constante de 36 cm/s. A l'origine des temps, la source commence à vibrer en se déplaçant vers le haut.

1. Écrire l'équation du mouvement de O en fonction du temps, puis l'équation du mouvement des points M et N, situés respectivement à 6,3 et à 9 mm de O. (On négligera la variation d'amplitude au cours de la propagation).
2. Comparer le mouvement des deux points considérés au mouvement de la source.
3. Représenter graphiquement le mouvement de O, de M et de N en fonction du temps.
4. Représenter graphiquement à l'instant t = 0,02 s, puis à l'instant t = 0,025 s l'aspect de la surface de l'eau en fonction de la distance à la source.

Exercice 2:

Une source effectue un mouvement harmonique de période 8 s. La trajectoire est un segment vertical de 12 cm de longueur. A l'origine des temps, la source passe par sa position d'équilibre et se déplace vers le bas.

Calculer:

1. les valeurs de l'amplitude, de la pulsation et de la phase initiale;
2. l'élongation, la vitesse et l'accélération de la source après 1 s;
3. le temps au bout duquel la source se trouve déplacée pour la première fois de 3 cm vers le haut.

On suppose maintenant que le mouvement vibratoire se propage sans amortissement dans le milieu environnant, la période dans l'espace (où longueur d'onde) étant égale à 320 cm.

Calculer:

4. la célérité dans le milieu considéré;
5. l'élongation, à l'instant t = 6 s, d'un point M du milieu situé à 20 cm de la source.

Exercice 3:

1. Par quelle force faut-il tendre une corde de longueur 0,5 m et de masse 0,8 g pour que le son fondamental émis soit le la3 de fréquence 220 Hz?
2. Quelles sont les fréquences des deux premiers harmoniques après le fondamental émis par cette corde dans les mêmes conditions?

Exercice 4:

La corde ré d'une guitare a pour fréquence fondamentale 293,7 Hz; la corde sol voisine vibre à 392 Hz. La longueur des parties vibrantes des deux cordes est R = 65 cm. On souhaite raccourcir la partie vibrante de l'une des deux cordes de manière qu'elle sonne à la même fréquence que l'autre.

1. Quelle corde faut-il raccourcir?
2. De combien faut-il la raccourcir?
3. Quelle est la longueur d'onde de la vibration sonore produite alors par les deux cordes? (La célérité du son dans l'air est 340 m/s.)

SERIGNE ABDOU WAHAB DIOP

PROFESSEUR AU LYCÉE DE BAMBEY

Ce document comporte des notes de mes cours en classe de Premières S_1 & S_2 au lycée de Bambey à l'attention de mes élèves et collègues.

NOTES DE COURS PREMIERES S